



2020

Turkish Journal of
Remote Sensing and GIS

Turkish Journal of Remote Sensing and GIS

Türk Uzaktan Algılama
ve CBS Dergisi



Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Halil AKINCI, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye.

Yardımcı Editörler / Associate Editors

Doç. Dr. Volkan YILMAZ, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ZEYBEK, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye.

Yabancı Dil Editörü / Language Editor

Doç. Dr. Volkan YILMAZ, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.

Sorumlu Yazı İşleri Müdürü / Managing Editor

Doç. Dr. Ayşe YAVUZ ÖZALP, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye.

Yayın Kurulu / Publishing Board

Prof. Dr. Çetin CÖMERT, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. İbrahim Öztuğ BİLDİRİCİ, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.
Prof. Dr. Mustafa TÜRKER, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Doç. Dr. Sedat DOĞAN, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye.

Editör Kurulu / Editorial Board

Prof. Dr. Ali Melih BAŞARANER, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Arzu ÇÖLTEKİN, University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland.
Prof. Dr. Arzu ERENER, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye.
Prof. Dr. Bülent BAYRAM, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Çetin CÖMERT, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Prof. Dr. Çiğdem GÖKSEL, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Dursun Zafer ŞEKER, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Fevzi KARSLI, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Prof. Dr. Füsün Balık ŞANLI, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. İbrahim Öztuğ BİLDİRİCİ, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, Türkiye.
Prof. Dr. İsmail Rakıp KARAŞ, Karabük Üniversitesi, Türkiye.
Prof. Dr. Mehmet ALKAN, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Mehmet Devrim AKÇA, Işık Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Mustafa TÜRKER, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Prof. Dr. Nesibe Necla ULUĞTEKİN, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Prof. Dr. Oğuz GÜNGÖR, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye.
Prof. Dr. Tarık TÜRK, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
Prof. Dr. Umut Güneş SEFERCİK, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze, Kocaeli, Türkiye.
Doç. Dr. Ahmet Özgür DOĞRU, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Doç. Dr. Caner GÜNEY, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Doç. Dr. Derya ÖZTÜRK, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, Türkiye.
Doç. Dr. İsmail Ercüment AYAZLI, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
Doç. Dr. Mehmet Ali YÜCEL, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye.
Doç. Dr. Krzysztof STERENCZAK, Instytut Badawczy Leśnictwa, Poland.
Doç. Dr. Nusret DEMİR, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye.



Editör Kurulu / Editorial Board

- Doç. Dr. Özlem AKAR, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye.
Doç. Dr. Saygın ABDİKAN, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Doç. Dr. Sultan KOCAMAN, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
Doç. Dr. Uğur ALGANCI, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Deniztan ULUTAŞ KARAKOL, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Esra TUNÇ GÖRMÜŞ, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Gülten KARA, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin BOSTANCI, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ÜSTÜNER, Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye.
Dr. Öğr. Üyesi Resul ÇÖMERT, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.
Dr. Abdulla M. AL-RAWABDEH, Yarmouk University, Irbid, Jordan.
Dr. Aikaterini KARAGIANNI, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
Dr. Davod POREH, University of Napoli Federico II, Napoli, Italy.
Dr. Manohar YADAV, Motilal Nehru National Institute of Technology (MNNIT) Allahabad Prayagraj, India.
Dr. Mohammed DABBOOR, Environment and Climate Change Canada.
Dr. Serkan URAL, ETH Zurich- Computational Physics, Switzerland.
Dr. Yasemin KUZU SINRAM, Hexagon Geospatial Ltd. USA.



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

ARAŞTIRMA MAKALELERİ RESEARCH ARTICLES

- Sentinel-3 Verileri ile Aktif Yangın Tespiti ve Sentinel-2 Verileri ile Doğrulanması
Detection of Active Fires with Sentinel-3 Data and Their Verification through the use of Sentinel-2 Data
Ümit Güler, Kaan Kalkan.....86 - 97
- Kent Kanyon Geometrilerinin Yer Yüzeysel Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi: Kurtuluş Mahallesi Örneği
The Influence of Urban Canyon Geometry on Land Surface Temperature: Kurtuluş Neighborhood
Müge Ünal Çilek.....98 - 111
- Sakarya Nehri'nin İnhisar (Bilecik) Çevresindeki 6 Yıllık Arazi Kullanımı Değişiminin Uzaktan Algılama Tabanında İncelenmesi
Investigation of 6-Year Land Use Change of Sakarya River Around İnhisar (Bilecik) using Remote Sensing
Coşkun Güneş, Hakan Uygucgil.....112 - 125
- Türkiye'de İpek Yolu Uzaktan Algılama İzleme ve Değerlendirme: Drone Sistemlerinin GPR ve RM ile Entegrasyonu
Remote Sensing Monitoring and Assessment of Silk Road in Turkey: Integrating Drone Systems with GPR and RM
Gökhan Kılıç.....126 - 138
- Orman Zararlılarının Verdiği Zararın Google Earth Engine Kullanılarak İzlenmesi
Monitoring the Damage in the Forest Caused by Forest Pests via Google Earth Engine
Şule Yaman, Esra Tunç Görmüş.....139 - 149
- Google Earth Engine Üzerinde Sentinel-2 Görüntülerinin Arazi Örtüsü Haritalama Doğruluğunun İyileştirilmesi
Improving the Land Cover Mapping Accuracy of the Sentinel-2 Imagery on Google Earth Engine
Çiğdem Serifoğlu Yılmaz.....150 - 159
- CBS Tabanlı AHP Yöntemi Kullanılarak Bitlis İlinin Heyelan Duyarlılık Haritalaması
Landslide Susceptibility Mapping in Bitlis Province using GIS-based AHP method
M. Cihan Aydın, Elif Sevgi Birincioğlu, Aydın Büyüksaraç.....160 - 171
- Gerçek Evapotranspirasyonun Landsat Uydu Görüntüleri Kullanarak SEBAL Modeli ile Hesaplanması: Bolu/Yeniçağa Örneği
The Estimation of Actual Evapotranspiration by the SEBAL Model Using the Landsat Satellite Images: A Case Study of Yeniçağa, Bolu
Atahan Evcen, Ali Levent Yağcı.....172 - 182
- Landsat ETM+ Uydu Görüntüleri ile Metal Kaynaklı Bitki Stresinin Araştırılması
Investigating Metal-Induced Vegetation Stress with Landsat ETM+ Satellite Images
Feride Seçil Yıldırım, Esra Tunç Görmüş.....183 - 190
- Taşkın Duyarlılık Haritalarının Oluşturulmasında Kullanılan Yöntemler
Methods Used in Flood Susceptibility Mapping
Çağla Melisa Kaya.....191 - 209

Sentinel-3 Verileri ile Aktif Yangın Tespiti ve Sentinel-2 Verileri ile Doğrulanması

Detection of Active Fires with Sentinel-3 Data and Their Verification through the use of Sentinel-2 Data

Ümit Güler^{1*}, Kaan Kalkan²

¹TÜRKSAT Uydu Haberleşme Kablo TV ve İşletme A.Ş., Ankara/Türkiye.

²TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Ümit Güler
uguler75@hotmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1095460

Yayın süreci

Geliş tarihi: 29.03.2022
Kabul tarihi: 06.09.2022
Basım tarihi: 18.09.2022

Özet

Küresel ısınmayla birlikte tüm dünyada orman yangınlarında görülmekte olan artış, son zamanlarda ülkemizde de belirgin şekilde hissedilmektedir. Bu artış, bu tür olayların en erken şekilde tespit edilmesi, izlenmesi ve kontrol altına alınmasına yönelik faaliyetlerin hızlı, organize ve doğru biçimde yapılmasını zorunluluk haline getirmiştir. Orman yangınlarının erken evrede tespitine ve takibine yönelik farklı yöntemler mevcuttur. Uydu görüntülerinin kullanımı bu yöntemlerden biridir ve alçak ya da yere eşzamanlı yörüngelerdeki uydular üzerine konulan faydalı yükler vasıtasıyla yangın tespitine yönelik çok değerli veriler alınabilmektedir. Bu çalışmada aktif orman yangınlarının izlenmesi ve yangından zarar gören alanın tespit edilmesi amacıyla 2021 yılında Antalya ili Manavgat ilçesinde büyük miktarda alanın yanması ile sonuçlanan orman yangını, Sentinel-2A ve Sentinel-3A verileri kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda orman yangınlarının izlenmesinde uyduların çok değerli bilgiler sağladığı görülmüş, yere eşzamanlı yörüngede bulunacak gelecek nesil uydularımızın, yangın tespiti ve izlenmesine yönelik veriler de sağlayacak şekilde tasarlanmasının ülkemizde meydana gelecek orman yangınlarının takibini kolaylaştıracağı değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Uzaktan algılama, CBS, Orman yangınları, Uydu, Aktif yangın tespiti

Abstract

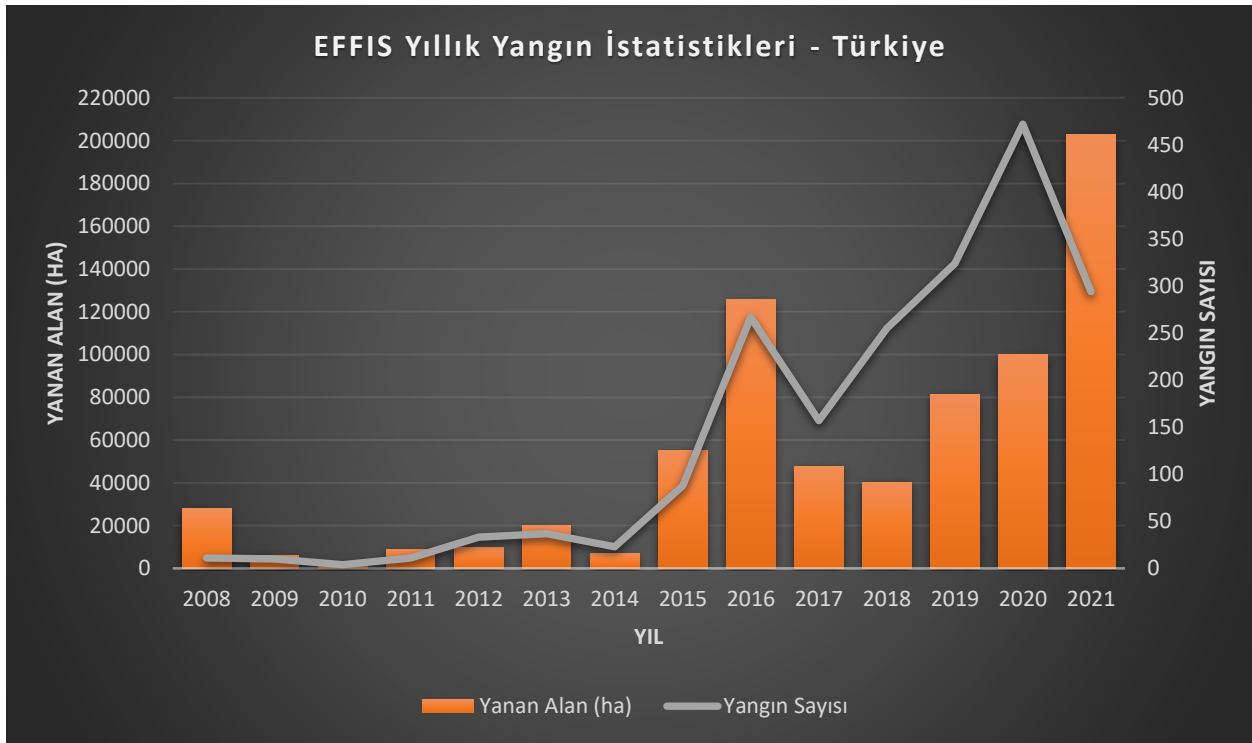
The increase in forest fires worldwide as a result of global warming has recently been felt clearly in our country as well. This increase necessitated the activities to detect, monitor and control such incidents in the earliest way, to be carried out quickly, organized and correctly. There are different methods for detecting and monitoring forest fires at an early stage. Using satellite remote sensing data is one of these methods and valuable data can be obtained for fire detection through payloads placed on different satellites in low or geosynchronous orbit. In this study, in order to monitor forest fires and determine the area damaged by the fire, the forest fire that resulted in the burning of a huge area in Manavgat district of Antalya province in 2021 was examined using Sentinel-2A and Sentinel-3A data. As a result of the study, it has been seen that satellites provide valuable information in the monitoring of forest fires and it has been pointed out that the design of our next-generation satellites in geosynchronous orbit, in a way that will provide data for fire detection and monitoring will facilitate the follow-up of forest fires that will occur in our country.

Keywords: Remote sensing, GIS, Forest fire, Satellite, Active fire detection

1. Giriş

Küresel ısınmayla birlikte artan sıcaklık ve azalan yağış, doğal yangınların oluşumu riskini arttıran kuru yakıt oluşumuna sebep olmaktadır. Bu tehdidin farkında olarak orman ekosistemi yangınlara karşı çok sıkı bir şekilde izlenmelidir. Yangına hızlı müdahale edilmeli, çevreleme ve söndürme prosedürleri doğru bir şekilde planlanmalıdır. Geleneksel yöntemlerde bu gerekliliklerin yerine getirilmesi için çok fazla zaman ve el emeği gerekmektedir, bu nedenle sürecin tatmin edici bir şekilde yönetilmesi imkânsız görünmektedir. Ancak teknolojik ilerlemeler bir orman yangınının her aşamasının daha hızlı ve daha doğru şekilde tespit edilmesini, kontrol altına alınmasını, analiz edilmesini ve izlenmesini mümkün kılmaktadır. Uzaktan Algılama (UA), herhangi bir coğrafi olay ile ilgili olarak hızlı ve doğru verilerin nihai kaynağı olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) aracılığıyla etkin bir şekilde analiz edildiğinde ve yardımcı verilerle birleştirildiğinde, erken tespit, kontrol altına alma, söndürme, hasar değerlendirmesi ve rejenerasyon izleme gibi durumlar kolayca ve etkin bir şekilde yönetilebilir (Esemen, 2011).

Orman yangınları ülkemizde her sene hektarlarca alanın yok olmasına neden olmaktadır. EFFIS (The European Forest Fire Information System) verilerine göre, 2020 yılında yanan toplam 99.857 ha alana karşılık 2021 yılında toplam 202.699 ha alan yanmıştır. Benzer bir trend Akdeniz'e komşu ülkeler Yunanistan ve İtalya'da da görülmektedir. Türkiye'de 2008 ile 2020 yılları arasında ortalama yanan alan miktarı 40.827,85 ha'dır. Ülkemizde 2008 yılından bu yana yıllara sâri olarak yangın sayısı ve yıl içerisinde yanan toplam alan miktarı Şekil 1'de verilmiştir (EFFIS, 2022). Türkiye'de ortalama yanan alan miktarı dikkate alındığında 2021 yılında gözlemlenen yüksek değer endişe vericidir.



Şekil 1. Türkiye yıllık yangın istatistikleri (EFFIS, 2022)

Yangınların bu yıkıcı etkilerini azaltmak amacıyla, çıkan yangınların erken tespiti, yayılım yönlerinin izlenmesi ve kontrol edilmesi önemli bir görev olmaktadır. Uydu verisi, bu problemin çözülmesini sağlayabilecek kaynaklardan bir tanesidir (Shumilo vd., 2020).

Bu kapsamda Terra (EOS AM-1) ve Aqua (EOS PM-1) uyduları üzerinde bulunan MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), kritik bir enstrümandır. Terra, kuzeyden güneye ekvator üzerinden sabah saatlerinde geçerken Aqua ise güneyden kuzeye ekvator üzerinden öğleden sonra geçer. Terra MODIS ve Aqua MODIS, Dünya yüzeyini her 1-2 gün içinde gözler (NASA, 2022b). Günde dört MODIS yangın gözlemi, operasyonel yangın yönetimi ihtiyaçları için sunulur. MODIS'in termal anomali/yangın verileri temelde MODIS 4 ve 11 mikrometre radyans ölçümlerinden elde edilir. Yangın tespit stratejisinin temeli, doğrudan tespite (yangın şiddeti tespit etmeye yetecek düzeyde olduğunda) ve arka plana görece tespite (yüzey sıcaklığını ve güneş yansımalarını hesaba katmak amacıyla) dayanır (NASA, 2022c). AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), çok amaçlı görüntüleme ekipmanıdır ve bulutluluk, deniz yüzey sıcaklığı, buz, kar ve bitki örtüsü karakteristiğinin küresel izlenmesi amacıyla kullanılır.

Kullanılabileceği alanlardan biri de yangın tespittir. AVHRR günde iki defa görünür ve kızıl ötesi bantlarda 1 km çözünürlüklü görüntü sağlar (Eumetsat, 2022). Giglio vd. (1999), NOAA'ya (National Oceanic and Atmospheric Administration) ait AVHRR verilerini kullanarak küresel aktif yangın gözlemi için önerilen algoritmalarından seçilenlerin karşılaştırmasını sunmuştur. Küresel gözlem imkânı veren NOAA'nın JPSS (Joint Polar Satellite System) sistemi 5 uydudan oluşur. Bunlar şu an aktif olan NOAA/NASA Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) uydusu, NAOO-20 (eski adı JPSS-1) ve gelecek olan JPSS-2, JPSS-3 ve JPSS-4 uydularıdır. Her bir uydu, yangın tespiti için de kullanılan VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) ekipmanına da sahiptir. JPSS uyduları kutupsal yörüngede dönerek iki günde küresel kapsama alanı elde eder (NOAA, 2022b, 2022c). NASA'nın FIRMS (Fire Information for Resource Management System) sistemi, NASA'nın Terra ve Aqua uyduları üzerindeki MODIS ve Suomi NPP ile NOAA-20 uyduları üzerindeki VIIRS ekipmanları sayesinde gözlem anından 3 saat içerisinde yangın/termal anomali verisini neredeyse gerçek zamanlı yayınlar (NASA, 2022a). Benzer şekilde FRP (Fire Radiative Power) verisi yere eşzamanlı yörüngede bulunan ikinci nesil Meteosat (MSG) uyduları üzerinde bulunan SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) ile de sağlanır. Bu FRP verisi 3 km mekansal çözünürlüğe ve 13 dk mekansal çözünürlüğe sahiptir (data europa eu, 2022). Yangınların tespitinde kullanılan diğer bir yere eşzamanlı uydu serisi GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) uydularıdır. Batı yarım küre için 2 km çözünürlüklü görüntü sağlamaktadır (NOAA, 2022a).

Neredeyse gerçek zamanlı yangın takibi için en fazla gelecek vadeden veri kaynağı Sentinel-3 verileridir. Sentinel-3'ün sunduğu bilgi, aktif yangın tespiti ve izlenmesi için kullanılmak üzere 1 km çözünürlüğe sahiptir ve günde iki defa sunulur (Shumilo vd., 2020).

Esemen (2011), 2008 yılında 31 Temmuz ile 5 Ağustos tarihleri arasında Antalya'nın Manavgat ve Serik ilçelerinde çıkan orman yangınlarının meydana getirdiği hasarı 20 m çözünürlüklü SPOT-4 uydu görüntülerini kullanarak değerlendirmiştir. Çalışmayla UA ve CBS gibi gelişmiş teknolojilerin doğal afetlerin tespiti, değerlendirilmesi ve analizinde ciddi fırsatlar sunduğu ve ülkemizin afet yönetiminde ve özellikle yangın izleme ve değerlendirmede CBS ve UA teknolojilerinin kullanımını standardize etmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Cihan vd. (2022), 1 Temmuz 2017'de İzmir ili Menderes ilçesinde gerçekleşen ve yaklaşık 67 saat süren Deliömerli orman yangınına Landsat-8 uydu görüntülerinden elde edilen yer yüzey sıcaklık haritaları ile analiz etmiştir. Analiz sonucunda yanan alanın kullanım sınıflarına göre yüzdeleri elde edilmiştir.

Nasery ve Kalkan (2020) tarafından yapılan çalışmada, İzmir ili Seferihisar, Menderes ve Karabağlar ilçelerinde 18 Ağustos 2019 tarihinde çıkan orman yangını incelenmiş, basında açıklanan yanan alan miktarının, çalışmada hesaplanan değerlerin çok altında olduğu ortaya konmuştur. Aynı yangın Özdemir ve Demir (2022) tarafından da UA teknikleri ile incelenmiş, yanan alanların Landsat-8 ve Sentinel-2 uydularına ait multispektral görüntüler (MSI) ile yapılan analizde tespit edilebildiği, C bandını kullanan Sentinel-1A uydusuna ait Yapay Açıklıklı Radar (SAR) görüntü analizlerinde ise yangın öncesi ve sonrası gözle görülür bir fark tespit edilemediği sonucuna varılmıştır.

Avcı ve Korkmaz (2021), Orman Genel Müdürlüğü'nün yangın kayıtları ve orman yangınlarıyla mücadelede tecrübeli 22 uzman ile yapılan mülakatlarla Türkiye'de son yıllarda çıkan orman yangınlarının sayı ve alansal olarak değişimini incelemiş ve çıkış nedenlerini analiz etmiştir. Çalışma sonucunda Türkiye'de yangın sayılarının genel olarak artma eğiliminde olduğu, çıkış sebebi bilinmeyen yangınların son yıllarda arttığı ve tüm yangınların artık yarısından fazlasının "meçhul" olarak kayıtlara geçtiği tespit edilmiştir. Çıkan yangınlar, yangın sayılarındaki artış, iklim değişikliği ve kuraklığa bağlı olarak yangına hassas alanların genişlemesi ve yanıcı madde birikiminin ve sürekliliğinin artması nedeni ile büyümektedir. Bu noktada ülkemizde güncel sorunların, yukarıda sayılan nedenlerden dolayı çıkan yangınların büyümesi, yangınların çoğunluğunun çıkış sebeplerinin belirlenememesi nedeniyle yeterli önlem alınamaması ve deneyimli yangın işçisi sayısının azlığı olduğu değerlendirilmiştir.

Shumilo vd. (2020) tarafından Ukrayna'da ulusal düzeyde otomatik yangın tespiti amacıyla MODIS, Landsat-8, Sentinel-2 ve Sentinel-3 ile elde edilen veriler değerlendirilmiş, Amazon bulut platformunda Horizon-2020 ERA-Planet SMURBS projesi kapsamında, Sentinel-3 verilerini kullanan otomatik yangın algılama iş akışının ve Ukrayna için yangın algılama sisteminin geliştirildiği ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda uydu verilerinin, orman yangınları, turba yangınları ve anız yakma gibi yasa dışı faaliyetlerin tespitini içeren aktif yangın tespiti için harika bir veri kaynağı olduğu ve Sentinel-3 verilerinin, iş akışı otomasyonu için yüksek doğruluk, yüksek zamansal çözünürlük ve basitlik nedeniyle neredeyse gerçek zamanlı yangın algılama görevi için büyük fırsatlar sağladığı ortaya konmuştur. Çalışmada ayrıca MODIS verilerinin yüksek zamansal çözünürlük nedeniyle de faydalı olabileceği, Landsat-8 arazi yüzey sıcaklık verileri ve Sentinel-2 multispektral verilerinin, daha yüksek mekansal çözünürlük nedeniyle yangın alanı ve sonuç analizi görevlerinde kullanılabileceği, en iyi sonuçların ise sadece yüksek doğruluk ve veri güncelleme sıklığını artırmakla kalmayıp aynı zamanda yangınla ilgili olayların ve birçok yönün derinlemesine analizini sağlama imkanı veren heterojen uydu verilerinin birleştirilmesiyle elde edilebileceği değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada 2021 yılında ülkemizde yaşanmış en büyük yangın olan Manavgat yangınının Sentinel-3A uydusu verileri ile analizi yapılmış, aktif yangın tespitine yönelik elde edilen bu analiz sonuçları Sentinel-2A uydusu görüntüleriyle tespit edilen yanan alan verileri ile karşılaştırılmıştır.

2. Çalışma Alanı

Çalışmada 28 Temmuz 2021’de Manavgat’ta başlayan ve yaklaşık 9 gün boyunca Gündoğmuş, Alanya, Akseki ve İbradı ilçeleri de dahil 5 ilçede süren orman yangınının yayılımı ve etkileri incelenmiştir.

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Uydu Haberleşme ve Uzaktan Algılama Uygulama ve Araştırma Merkezi (UHUZAM) tarafından yapılan analizlere göre bölgede toplam yaklaşık 36.500 ha alanın yandığı tespit edilmiştir (NTV, 2022). Bu yangına kadar ülkemizde yaşanan en büyük yangında 2008 yılında Antalya ili Manavgat ilçesi Taşağıl bölgesinde yaklaşık 16.000 ha alan yanmıştır. Bu veri göz önünde bulundurulduğunda, 2021 Manavgat yangını, ülkemizde yaşanmış en büyük yangın felaketi olarak kayıtlara geçmiştir (GTU, 2022).

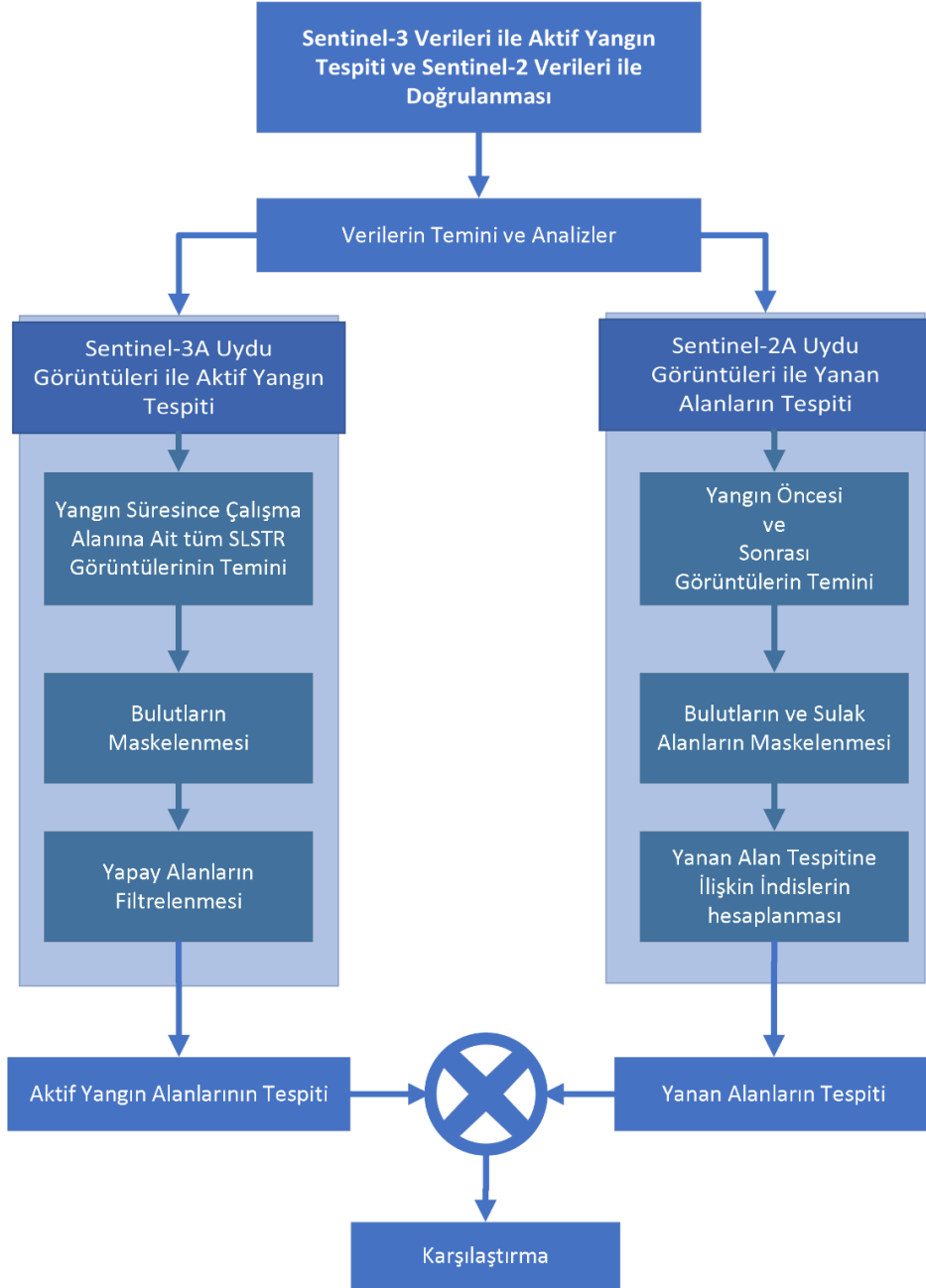
Şekil 2’de verilmiş olan çalışma alanı, Antalya’nın Manavgat İlçesi’ni içine alan $31^{\circ}14'32''$ ile $31^{\circ}7'43''$ Doğu boylamları ve $36^{\circ}40'36''$ ile $37^{\circ}5'57''$ Kuzey enlemleri arasında kalan Akdeniz iklimi etkisi altındaki bölgedir.



Şekil 2. Çalışma alanı

3. Yöntem

2021 yılında Antalya ili Manavgat ilçesinde çıkan yangının farklı uydu görüntüleri ile analiz edildiği bu çalışmada kullanılan yöntem Şekil 3'te gösterilmiştir. Öncelikle zamansal çözünürlüğe bağlı olarak çalışma alanı için mevcut tüm Sentinel-3A uydu görüntüleri kullanılarak yangın süresince çalışma alanında aktif yangınlar tespit edilmiştir. İkinci aşamada yangın öncesi ve sonrası temin edilen Sentinel-2A uydu görüntüleri karşılaştırılarak yanan alanlar tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda birinci aşamada aktif yangın tespiti yapılan alanlar ile ikinci aşamada yandığı tespit edilen alanların karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 3. İş akış şeması

3.1 Aktif Yangın Tespiti

İlk aşamada, Sentinel-3A uydusundan yaklaşık günde iki defa alınan termal kızılötesi yangın bantları kullanılarak aktif yangın tespiti analizleri uygulanmıştır. Bu amaçla yaklaşık 800-830 km LEO yörüngede bulunan Sentinel-3A uydusu üzerindeki 9 spektral banda sahip SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) aracı kullanılmıştır.

SLSTR; 0,555 μm (S1), 0,660 μm (S2), 0,870 μm (S3), 1,6 μm (S5), 3,74 μm (S7), 10,8 μm (S8) ve 12 μm (S9) ile birlikte gelişmiş bulut tespiti için 1,375 μm (S4) ve 2,25 μm (S6) şeklinde iki yeni spektral banda sahiptir. SLSTR ayrıca daha geniş dinamik aralığa sahip 10,8 μm (F2) kanalı ve 3,7 μm 'de (F2) özel algılayıcıları ile aktif orman yangınlarını ölçme yeteneğine sahiptir. Termal kızılötesi (TIR) algılayıcılar (S7-S9, F1, F2) 1 km çözünürlüğe sahipken görünür bölge (VIS) ve kısa dalga kızılötesi (SWIR) kanalları 0,5 km çözünürlüğe sahiptir (ESA, 2022c). Doyma noktası, F1 bandı için 500 K, F2 bandı için ise 400 K'dir (ESA, 2022d).

28 Temmuz 2021'de Manavgat'ta başlayan yangın 9 gün sürmüştür. Aktif yangın tespiti için aşağıda Tablo 1'de gün ve saatleri verilen Sentinel-3A verileri kullanılmıştır. Bu veriler, Sentinel-3A'nın çalışma alanında yangın süresi için sağladığı tüm verilerdir. Bazı günler sabah ya da gece saatlerinde çalışma alanı için veri mevcut olmadığı da Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan Sentinel-3A verileri

Tarih	Gündüz		Gece	
	Veri Durumu	Saat	Veri Durumu	Saat
28.07.2021	Yok		Var	20:07
29.07.2021	Var	08:24	Var	19:40
30.07.2021	Var	07:57	Var	19:14
31.07.2021	Yok		Yok	
01.08.2021	Yok		Var	20:03
02.08.2021	Var	08:20	Var	19:40
03.08.2021	Var	07:54	Var	19:10
04.08.2021	Yok		Yok	
05.08.2021	Yok		Var	19:59

Tabloda yer alan L1B seviyesinde işlenmiş görüntüler ESA Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) internet sitesinden indirilmiş, indirilen görüntülerin işlenmesi SNAP (Sentinel Application Platform) yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada F1 ve F2 bantları aktif yangın tespiti için kullanılırken, S2, S3 ve S9 bantları ise yangın tespitinin önemli bir kısmı olan bulut maskeleyme için kullanılmıştır.

Kalın bulut tabakası aktif yangınların pasif UA ile algılanmasını imkânsız hale getirdiğinden, bulutların maskelenmesi, aktif yangın piksellerinin tespiti için gereklidir. Ayrıca, belirli bulutlardan yansıyan orta kızıl ötesi (MIR) radyasyonu yangın işaretlerine benzerdir ve yangın tespiti öncesi maskelenmemeleri durumunda bazı bulut içeren pikseller hatalı şekilde yangın olarak sınıflandırılabilir (Wooster vd., 2012). Bulut maskesi yansıma değerlerini kullandığı için öncelikle radyans değerlerinin reflektans değerlerine çevrilmesi gerekmektedir. Sonraki aşamada, farklı çözünürlükte bantlar ile işlem yapılamadığı için yeniden örnekleme yapılarak tüm bantlar, asıl kullanacağımız bant olan yangın bantlarının sahip olduğu 1 km çözünürlüğe çevrilmiştir. Sentinel-3A L1B görüntülerinin tümü WGS84 UTM Zone 36 projeksiyonuna çevrilmiş, çalışma alanına göre kesilmiştir. Bu anlatılan işlemler gündüz görüntüleri için uygulanmış olmakla birlikte gece görüntüleri için tek fark reflektans değerlerine dönüşüm yapılmamasıdır.

Gündüz görüntülerindeki pikseller aşağıdaki koşullar gerçekleştiğinde bulut tarafından engellenmiş olarak değerlendirilir (Giglio vd., 2003). Burada, ρ_{λ} , λ (μm) dalga boyunda yansıma, T_{λ} ise λ (μm) dalga boyunda termal bantı göstermektedir.

$$(\rho_{0,65} + \rho_{0,86} > 0.9) \text{ veya } (T_{12} < 265 \text{ K}) \text{ veya } (\rho_{0,65} + \rho_{0,86} > 0.7) \text{ ve } (T_{12} < 285 \text{ K})$$

Gece görüntülerindeki pikseller ise $T_{12} < 265 \text{ K}$ koşulu gerçekleştiğinde bulut tarafından engellenmiş olarak değerlendirilir. Bu basit kriterlerin avantajı, yangın piksellerinin hiçbir zaman yanlışlıkla bulut olarak algılanmamasıdır (Giglio vd., 2003).

ESA Sentinel-3 uydusu üzerinden bulunan SLSTR sensöründen elde edilen verilerin kullanıldığı çok kanallı aktif yangın tespiti ve yangın tanımlaması algoritmasının teorisi, Wooster vd. (2022) tarafından açıklanmaktadır.

Aktif yangınlar, bu esnada F1 ve F2 bantları radyans değerleri arasında ortaya çıkan fark ile tespit edilmektedir. 1x1 km'lik piksel içerisindeki bir sıcak bölge, bu bantlar arasında fark yaratacak kadar etkilidir. Buna ilişkin matematiksel ifadeyi uygulamadan önce yapay alanların filtrelenmesi gerekir. Zira şehir yapıları gibi yapay alanlar hatalı pozitif neden olabilmektedir. Bu amaçla SNAP'te "Add Land Cover Band" modülü kullanılmış, arazi örtüsü (CCI-LC, 2022) seçenekleri içerisinde doğal alanları ifade eden 50 ile 130 arasındaki sınıflar seçilmiştir. Aktif yangın tespiti için kullanılan koşullar Tablo 2'de verilmiştir. Gece koşullarında bulut maskesi ve orman olmayan piksellerin maskelenmesi aynı şekilde yapılmıştır. Fakat gece arka plan daha soğuk olduğu için eşik değerleri bir miktar düşürülmüştür (Serco Italia SPA, 2022a).

Tablo 2. Aktif yangın tespiti hesaplama kriterleri (Serco Italia SPA, 2022a)

Kriter	Koşul (Gündüz)	Koşul (Gece)
İlk Test	F1_BT_in > 325 K	F1_BT_in > 315 K
Sıcak arka planın bertaraf edilmesi	(F1_BT_in - F2_BT_in) > 18 K	(F1_BT_in - F2_BT_in) > 15 K
Bulutların maskelenmesi	cloud_mask == 0	
Orman olmayan piksellerin maskelenmesi	'land_cover_CCILandCover-2015' >= 50 and 'land_cover_CCILandCover-2015' <= 130	

SNAP ile elde edilen sonuç haritası GeoTiff formatında QGIS yazılımına aktarılmış, vektör formatında görselleştirilmesi sağlanmıştır.

3.2 Yanan Alanların Tespiti

Çalışmanın ikinci aşamasında yangın etki tespiti yapılmıştır. Bu amaçla 15 Temmuz 2021 tarihine ait yangın öncesi görüntüler ile 14 Ağustos 2021 tarihine ait yangın sonrası görüntüler kullanılmıştır. Çalışma alanını kapsayan, Sentinel-2A uyduyu isimlendirme kuralına göre T36SUF, T36SUG, T36SVF ve T36SVG olarak isimlendirilen bölgelere ait olan ve UTM/WGS84 projeksiyonunda, Level-2A seviyesinde işlenerek radyometrik ve atmosferik düzeltmeleri yapılmış bu görüntüler ESA Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) internet sitesinden indirilmiştir. İndirilen görüntülerin işlenmesi de SNAP yazılımı ile yapılmıştır. Çalışmada kullanılan bantlar 10 metre çözünürlüklü B3 (Yeşil) ve B8 (yakın kızılötesi, NIR) ile 20 metre çözünürlüklü B12 (SWIR) bantlarıdır. İlk aşamada çalışmayı olumsuz etkilememesi için bulutların maskelenmesi amacıyla bulut maskesi bandı hazırlanmıştır. SNAP'in "subset" modülü ile görüntü toplam bu dört banda (3, 8, 12 bantları ile daha önce hazırlanmış olduğumuz bulut maskesine ilişkin bant) indirgenmiş ve çözünürlüklerin aynı olmasını sağlamak üzere 10 metre çözünürlüklü banda göre yeniden örnekleme işlemi uygulanmıştır. Çalışma alanını oluşturan dört görüntü, mozaikleme işlemi ile birleştirilmiş, projeksiyon işlemi de yapılarak çalışma alanına göre kesilmiştir. Aynı işlemler yangın sonrası görüntüler için de tekrarlanmıştır.

Yanan alanları tespit etmek üzere NBR (Normalized Burn Ratio) indeksi kullanılmaktadır. Düşük NBR değeri çıplak alan ya da yeni yanmış alanları, yüksek NBR ise sağlıklı bitki örtüsünü göstermektedir. Yeni yanan alanlar NIR bandında düşük yansıma, SWIR bandında ise yüksek yansıma değerine sahiptir.

NBR indeks hesabı aşağıda Denklem 1 ile (Escuin vd., 2008; García ve Caselles, 1991), Sentinel-2 bantları özelinde ise Denklem 2 ile verilmiştir. Bu indeks çıplak alanlar ile yeni yanan alanları ayırt edemez gibi görünse de yangından önce ve sonraki görüntüler arasındaki farklar alınacağı için yanan alanlar ortaya çıkartılacaktır.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

$$NBR = \frac{B8 - B12}{B8 + B12} \quad (Sentinel - 2) \quad (2)$$

Yangından önce ve sonrası için elde edilen NBR görüntülerinin karşılaştırılabilmesi için iki görüntünün histogramları eşitlenmiştir. SNAP yazılımında sonraki aşamada bu iki görüntü "collocation" işlemine tabi tutularak birleştirilmiştir. NBR neticesinde sulak alanlar ile yanmış alanlar benzer sonuçlar verdiği için sulak alanların maskelenmesi gerekmektedir. Bu durumu maskeleyen için NDWI (Normalized Difference Water Index) indeksi kullanılacaktır. NDWI indeks hesabı aşağıda Denklem 3 ile Sentinel-2 bantları özelinde ise Denklem 4 ile verilmiştir. Bu indeks uygulandığında su alanları pozitif değerler alırken, toprak ve karasal bitki alanları ise yeşile göre NIR bölgesinde daha yüksek yansıma sergiledikleri için 0 ya da negatif değerler alır (McFeeters, 1996).

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (3)$$

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8} \quad (Sentinel 2) \quad (4)$$

Yangın öncesi ve sonrası görüntülerden hesaplanan NBR değerlerinin farkları kullanılarak Relativized Burn Ratio (RBR) elde edilmektedir. NBR fark değerleri Denklem 5 ile RBR değeri ile Denklem 6 ile hesaplanmaktadır.

RBR, dNBR değerinin normalize edilmiş şeklidir. En yalın haliyle RBR, dNBR değerinin yangın öncesi NBR değerinin 1.001 fazlasına bölümü ile hesaplanır. Paydaya 1.001 değerinin eklenmesi paydanın 0 olmasını ve denklemin sonsuz değerine ulaşmasını önler (Parks vd., 2014).

$$dNBR = NBR_{yangin_öncesi} - NBR_{yangin_sonrası} \quad (5)$$

$$RBR = \frac{dNBR}{(NBR_{yangin_öncesi} + 1.001)} \quad (6)$$

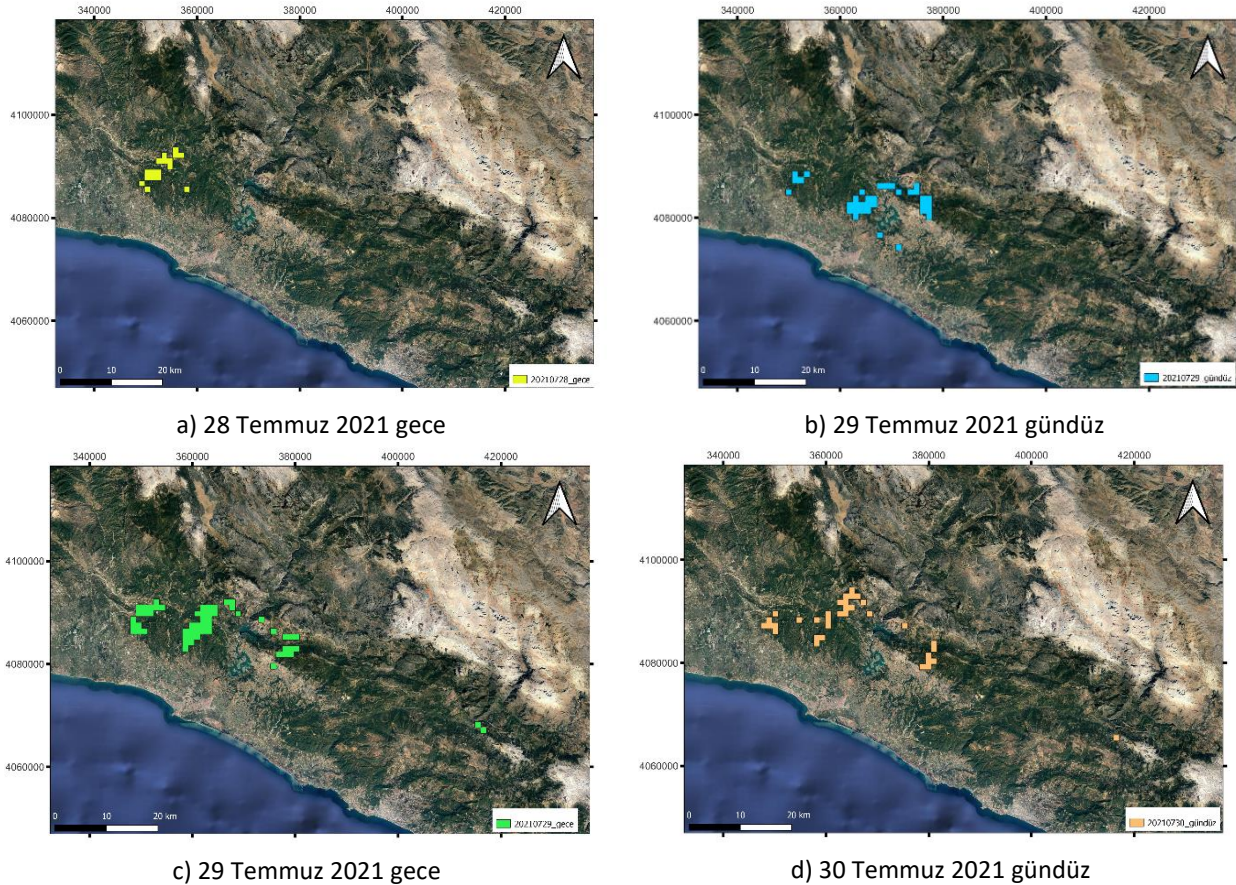
Bulut ve su maskesi uygulanan ve RBR dönüşümü uygulanan görüntülerde yanmış alanlar daha parlak görünmektedir. Zira yangın öncesi ve sonrası değişim daha fazladır. Sonuçta 0.27 değerinden daha büyük değer alan pikseller yanmış olarak sınıflandırılmıştır (Serco Italia SPA, 2022b). SNAP ile elde edilen sonuç haritası, GeoTiff formatında QGIS yazılımına aktararak vektörel olarak haritalandırılması sağlanmıştır. Bununla birlikte, elde edilen günlük aktif yangın verileri raster formatında ArcGIS yazılımında bulunan "Math" fonksiyonuyla birleştirilerek tekrar vektör formatına çevrilmiş, bu veri Sentinel-2A ile elde edilen yangından etkilenen alan verileri ile kıyaslamada kullanılmıştır.

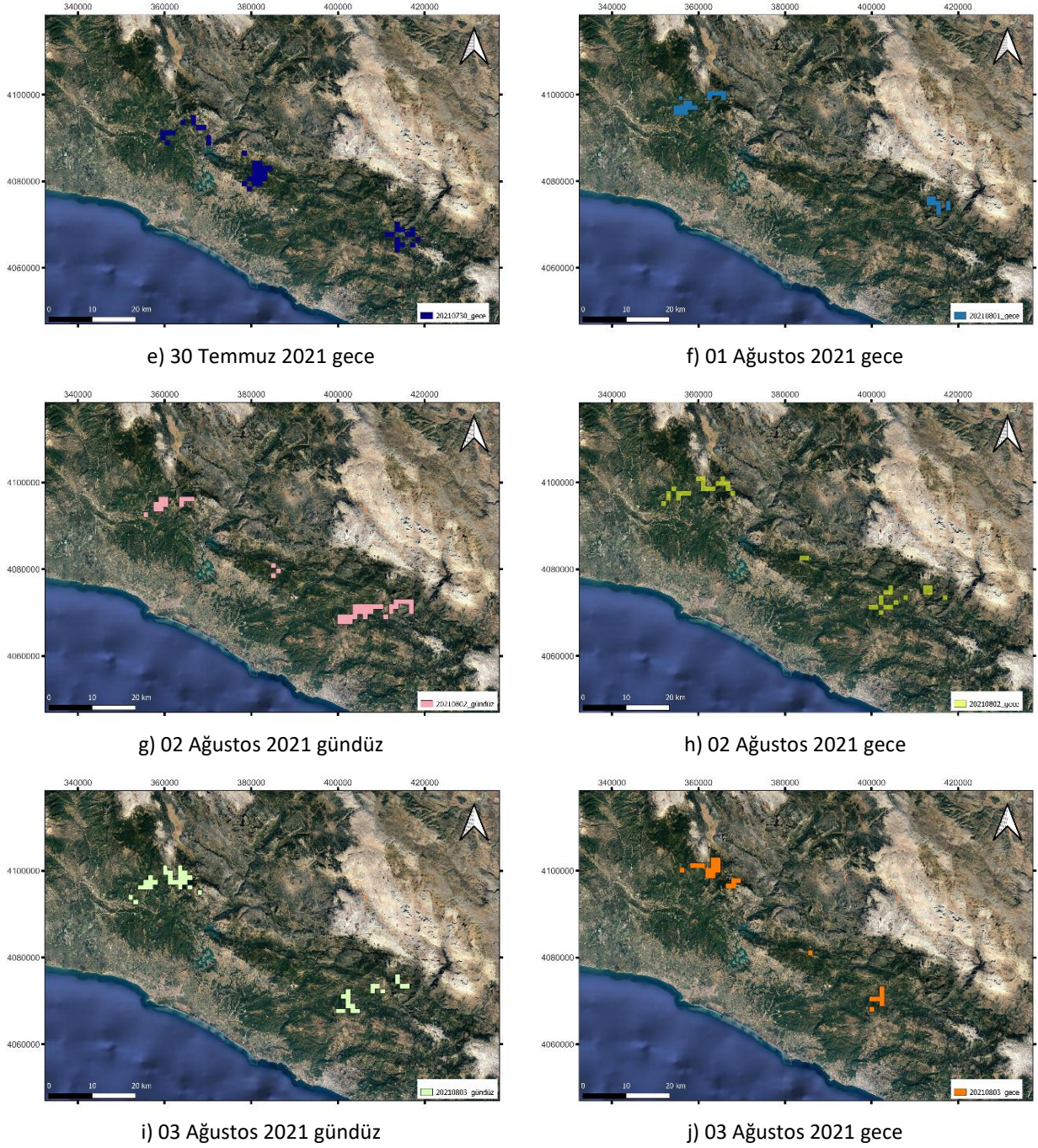
3.3 Aktif Yangın Alanları ile Yandığı Tespit Edilen Alanların Karşılaştırılması

Çalışma sonucunda öncelikle Sentinel-2A ve Sentinel-3A verileri ile elde edilen yanmış alanların yüzölçümleri hesaplanmıştır. Sentinel-2A ve 3A görüntüleri ile elde edilen görüntülerin kıyaslanabilir olması amacıyla, Sentinel-3A ile elde edilen görüntülerin çözünürlüğü, yeniden örnekleme yapılarak Sentinel-2A ile aynı değere getirilmiş ve Sentinel-2A ile yandığı tespit edilen alanların Sentinel-3A ile tespit edilen aktif yangınlar ile ne oranda örtüştüğü hesaplanmıştır.

4. Bulgular

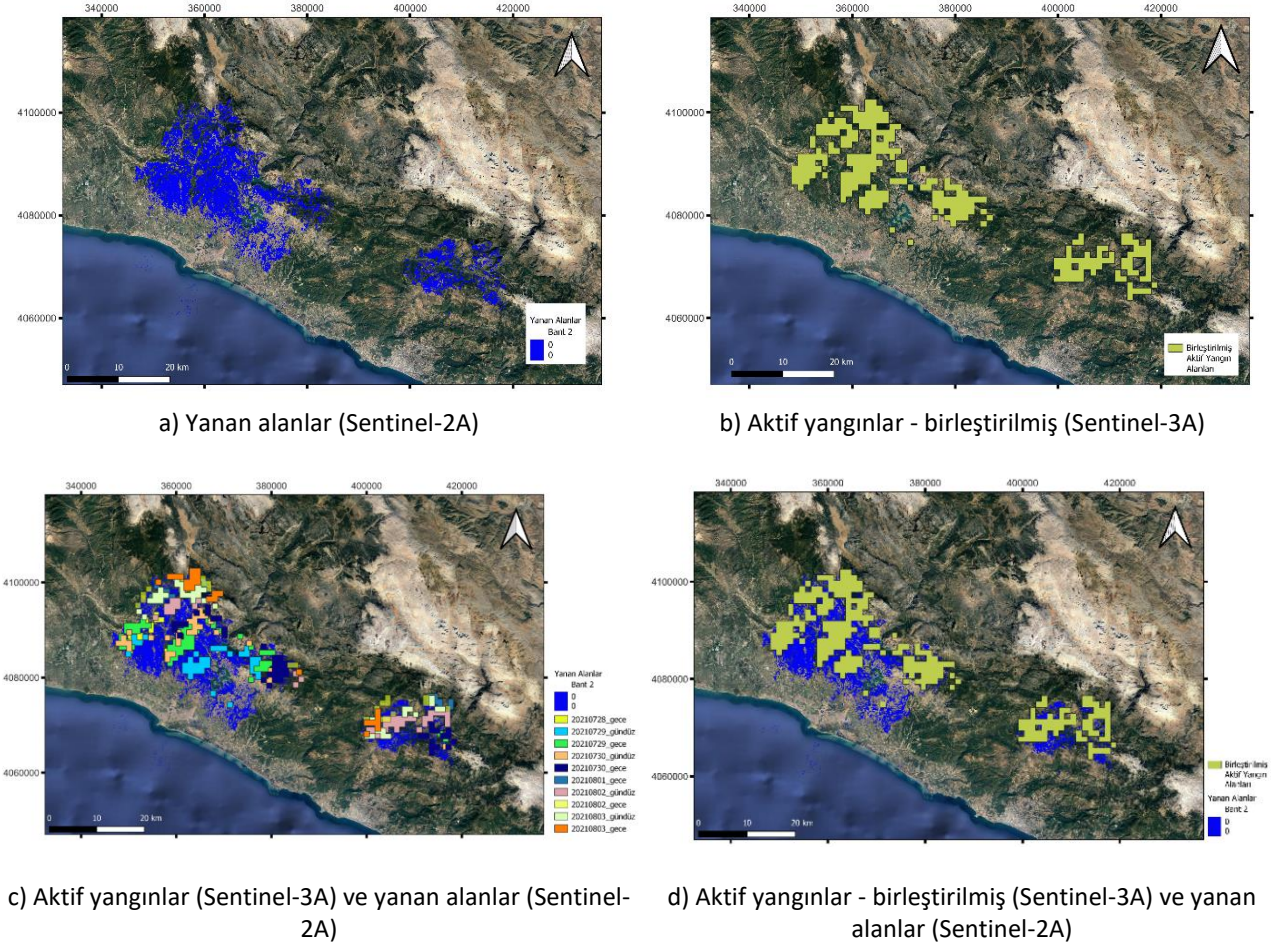
Sentinel-3A verileri ile yapılan analizler sonucu aktif yangının ilerlemesini gösteren haritalar Şekil 4'te verilmiştir. Yapılan analizler, 5 Ağustos 2021 akşamı aktif yanan alan kalmadığını göstermiştir.





Şekil 4. Aktif yangının ilerlemesi

Sentinel-2A uydusu ile yapılan analizler sonucunda yangından etkilenen alanlar Şekil 5a'da, Sentinel-3A uydusu ile tespit edilen aktif yangınların birleştirilmiş alanı Şekil 5b'de aktif yangının günlük ilerleyişi ve yangından etkilenen alanların gösterimi Şekil 5c'de, aktif yangınların birleştirilmiş alanı ile yangından etkilenen alanların beraber gösterimi ise Şekil 5d'de verilmiştir.



Şekil 5. Sentinel-2A ve 3A ile elde edilen haritalar

Sentinel-2A verileri ile elde edilen yanan alanların yüzölçümü hesaplandığında 39.400 ha alanın yandığı tespit edilmiştir. Sentinel-3A verileri ile tespit edilen aktif yangınların etkili olduğu birleştirilmiş alan ise 36.700 ha'dır. Bu iki değer birbirine yakın olduğu görülmekle birlikte Sentinel-2A ve 3A görüntüleri ile yapılan bu analizler, görüntülerin farklı çözünürlüklerde olması nedeni ile doğrudan kıyaslanabilir değildir. Sentinel-3A ile elde edilen görüntülerin Sentinel-2A ile aynı çözünürlüğe getirilmesi suretiyle yapılan analizler, 10 metre gibi yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip Sentinel-2A ile yandığı tespit edilen alanlar ile 1 km gibi düşük mekânsal çözünürlüğe sahip Sentinel-3A ile elde edilen aktif yangın dağılımının % 38,83 oranında örtüştüğünü göstermiştir.

5. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, 2021 yılında Antalya ili Manavgat ilçesinde çok büyük miktarda alanın yanması ile sonuçlanan orman yangınının günlük takibi Sentinel-3A verileri kullanılarak yapılmıştır. Çalışma, uydu verilerinin orman yangınlarının takibi için kritik önemde olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur. Sentinel uydu verileri özelinde yapılan bu çalışmada, daha önce yayınlanan çalışmalardan farklı olarak, Sentinel-2A uydusu görüntülerinin analiz edilmesiyle yandığı tespit edilen alanların, Sentinel-3A uydusu görüntüleri kullanılarak tespit edilen aktif yangın alanlarıyla hangi oranda örtüştüğü analiz edilmiş ve aktif yangınların daha yüksek hassasiyetle ve hızlı bir şekilde tespitine yönelik öneriler getirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, Sentinel-2A verileri ile yangından zarar gören yerler tespit edilmiş, Sentinel-3A ile elde edilen günlük aktif yangın dağılımı ile %38,83 oranında örtüştüğü görülmüştür. Bu sonucun Sentinel-3A uydusunun zamansal çözünürlüğü ile ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Gündüz ve gece gözlemleri beraber değerlendirildiğinde zamansal çözünürlüğü 1,5 gün (ESA, 2022b) olan Sentinel-3A uydusu, uydunun ardışık geçişleri arasında yangının yayılımını izlemekte yetersiz kalabilmektedir. Yaklaşık 9 günlük yangın süresince çalışma alanı için temin edilen uydu verileri değerlendirildiğinde uydunun gündüz geçişlerinde sadece 4 gün, gece geçişlerinde ise sadece 7 gün veri alınabildiği görülmektedir.

Buna rağmen elde edilen sonuçlar, sahip olduğu yüksek mekânsal çözünürlüğe karşı 5 gün (ESA, 2022a) gibi görece düşük zamansal çözünürlüğe sahip Sentinel-2A uydusu ile yapılan analizlere kıyasla, düşük mekânsal çözünürlüğe sahip olmakla birlikte görece daha yüksek zamansal çözünürlüğe sahip Sentinel-3A uydusu ile elde edilen sonuçların aktif yangın takibi açısından ne kadar değerli olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte düşük mekânsal çözünürlük ile elde edilen sonuçlar önceki bölümlerde incelenen yere eşzamanlı yörüngede bulunan 2-3 km mekânsal çözünürlüklü sistemlerin kullanımını da teşvik edici olmaktadır. Zira yere eşzamanlı yörüngenin kendine has özelliği, bu yörüngede bulunan uyduların dünya üzerinde belirli, değişmez ve sürekli bir servis alanına sahip olmalarını ve böylece zamansal çözünürlük açısından sınırlanmaksızın sürekli yangın gözlemi yapılabilmesini sağlayabilecektir. Bu bağlamda yangın tespiti ve izlenmesi hedefi doğrultusunda bu yörüngedeki uydulara konumlandırılacak faydalı yükler, lokal ölçekte belirli bir ülke veya bölgeye odaklı olarak tasarlanmaları halinde çok değerli veriler sağlayabilir.

Çalışmanın devamında Türkiye özelinde yangın tespiti yapabilecek yere eşzamanlı yörüngede çalışacak bir uzaktan algılama sisteminin analiz çalışmalarının yapılması planlanmaktadır. Bununla birlikte yangının yayılımına ve ilerleme yönüne etki edebilecek sıcaklık, nem, basınç, rüzgâr hızı, rüzgâr yönü ve topoğrafik faktörlerin ve etki derecelerinin analizine de bu çalışmalarda yer verilecektir.

Orman yangınlarının uzun vadeli geri döndürülemez etkileri, bir Akdeniz ülkesi olan ülkemizde orman yangınlarının her geçen yıl sayısı ve etki olarak artış göstermesi, Akdeniz'e komşu ülkelerde de benzer problemlerin artması ve yüzölçümümüzün büyüklüğü de dikkate alındığında yangınların erken tespiti ve izlenmesi daha da önem kazanmaktadır. Dünyada birçok ülke ve uluslararası organizasyon tarafından aktif yangınların izlenmesi için kullanılan uydu verilerinin, ülkemizde de bu amaca yönelik olarak kurulması gerekli sistemler içerisinde bulunması önem arz etmektedir. Bu amaca yönelik olarak, sadece uydu satın alan değil, GÖKTÜRK-2 ve İMECE alçak yörünge uyduları ve TÜRKSAT-6A yere eşzamanlı yörünge uydusu gibi projelerle artık uydu üreten bir ülke vasfı kazanmış olmamız da dikkate alındığında, yere eşzamanlı yörüngede konumlandırılacak TÜRKSAT gibi gelecek nesil haberleşme uydularına yangın tespiti ve izlenmesine yönelik konuk (hosted) faydalı yük yerleştirilmesinin değerlendirmeye alınmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

- Avcı, M., & Korkmaz, M. (2021). Türkiye'de orman yangını sorunu: Güncel bazı konular üzerine değerlendirmeler. *Turkish Journal of Forestry*, 22(3), 229-240.
- CCI-LC. (2022, Ocak 29). Quick user guide of the Land Cover State products in GTiff and NetCDF formats. Retrieved from http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-QuickUserGuide-LC-Maps_v2-0-7.pdf
- Cihan, A., Cerit, K., & Erenner, A. (2022). Yangın alanında uydu görüntüleri ile yer yüzey sıcaklık değişimi gözlemi ve mekânsal alan tespiti. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(1), 142-155.
- data europa eu. (2022, Ocak 25). SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) Fire Radiative Power (FRP) data from the Meteosat Second Generation (MSG) Satellite. Retrieved from <https://data.europa.eu/data/datasets/seviri-spinning-enhanced-visible-and-infrared-imager-fire-radiative-power-frp-data-from-the-met1?locale=es>
- EFFIS. (2022, Ocak 16). EFFIS Annual Country Statistics for TR - Turkey. Retrieved from <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis.statistics/effisestimates>
- ESA. (2022a, Haziran 14). Sentinel-2 MSI Revisit and Coverage. Retrieved from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/revisit-coverage>
- ESA. (2022b, Haziran 14). Sentinel-3 SLSTR Coverage. Retrieved from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/Sentinel-3-slstr/coverage>
- ESA. (2022c, Ocak 24). Sentinel-3 SLSTR Instrument Description. Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr/instrument/description>
- ESA. (2022d, Ocak 24). Sentinel-3 SLSTR Instrument Specifications. Retrieved from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr/instrument/specifications>
- Escuin, S., Navarro, R., & Fernandez, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053-1073.
- Esemen, K. (2011). *Forest fire analysis using satellite imagery* (Master tezi). İstanbul Technical University, Institute of Informatics, İstanbul.
- Eumetsat. (2022, Ocak 25). AVHRR. Retrieved from <https://www.eumetsat.int/avhrr>
- García, M. L., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International*, 6(1), 31-37.
- Giglio, L., Kendall, J., & Justice, C. (1999). Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(10), 1947-1985.
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., & Kaufman, Y. J. (2003). An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3), 273-282.

- GTU. (2022, Mart 20). Manavgat Yangını GTÜ Tarafından Haritalandı. Retrieved from <https://www.gtu.edu.tr/icerik/8/12549/display.aspx>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- NASA. (2022a, Ocak 25). Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Retrieved from <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>
- NASA. (2022b, Ocak 25). MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - About. Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- NASA. (2022c, Ocak 25). MODIS Thermal Anomalies/Fire. Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod14.php>
- Nasery, S., & Kalkan, K. (2020). Burn area detection and burn severity assessment using Sentinel 2 MSI data: The case of Karabağlar district, İzmir/Turkey. *Turkish Journal of Geosciences*, 1(2), 72-77.
- NOAA. (2022a, Ocak 25). GOES-R Advanced Baseline Imager (ABI) Algorithm Theoretical Basis Document For Fire / Hot Spot Characterization. Retrieved from https://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/documents/ATBDs/Baseline/ATBD_GOES-R_FIRE_v2.6_Oct2013.pdf
- NOAA. (2022b, Ocak 25). Joint Polar Satellite System. Retrieved from <https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/currently-flying/joint-polar-satellite-system>
- NOAA. (2022c, Ocak 25). Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS). Retrieved from <https://www.nesdis.noaa.gov/current-satellite-missions/currently-flying/joint-polar-satellite-system>
- NTV. (2022, Mart 20). Orman yangınları uzaydan görüntülendi: 85 bin futbol sahası büyüklüğünde alan yandı. Retrieved from https://www.ntv.com.tr/galeri/turkiye/orman-yanginlari-uzaydan-goruntulendi-85-bin-futbol-sahasi-buyuklugunde-alan-yandi,BMqnR3bqSkSetgqllPDTXg/IB5R2MkJjkit4-dVD_pyEw
- Özdemir, F. B., & Demir, N. (2022). 2019 İzmir karabağlar ilçesi orman yangın alanının uydu görüntüleri ile analizi. *Türk Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, 3(1), 20-33.
- Parks, S. A., Dillon, G. K., & Miller, C. (2014). A new metric for quantifying burn severity: the relativized burn ratio. *Remote Sensing*, 6(3), 1827-1844.
- Serco Italia SPA. (2022a, Ocak 29). Active Fire Detection with Sentinel-3 SLSTR using SNAP. Retrieved from https://rus-copernicus.eu/portal/wp-content/uploads/library/education/training/HAZA04_ActiveFire_Portugal_Tutorial_Webinar.pdf
- Serco Italia SPA. (2022b, Ocak 29). Burned Area Mapping with Sentinel-2 (SNAP), Portugal (version 1.2). Retrieved from https://rus-copernicus.eu/portal/wp-content/uploads/library/education/training/HAZA02_BurnedArea_Portugal.pdf
- Shumilo, L., Yailymov, B., & Shelestov, A. (2020, September). Active fire monitoring service for Ukraine based on satellite data. In *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings*. (pp. 2913-2916). IEEE.
- Wooster, M. J., Xu, W., & Nightingale, T. (2012). Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: Pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets. *Remote Sensing of Environment*, 120, 236-254.
- Wooster, M. J., Xu, W., & Emsley, S. (2022, Ocak 25). Sentinel-3 Optical Products and Algorithm Definition. Active Fire: Fire Detection and Fire Radiative Power Assessment. Retrieved from https://sentinel.esa.int/documents/247904/0/SLSTR_Level-2_Fire_ATBD.pdf/77f452ea-ee65-4f84-a9cb-cc68d1c03c6f

Kent Kanyon Geometrilerinin Yer Yüzeyi Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi: Kurtuluş Mahallesi Örneği

The Influence of Urban Canyon Geometry on Land Surface Temperature: Kurtuluş Neighborhood

Müge Ünal Çilek^{1*} 

¹Fırat Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 23119, Elazığ/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Müge Ünal Çilek
mugeunal@firat.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1095619

Yayın süreci

Geliş tarihi: 30.03.2022
Kabul tarihi: 20.06.2022
Basım tarihi: 18.09.2022

Özet

Kentsel mekanda binalar ve sokakların oluşturduğu form kent kanyonu olarak tanımlanmaktadır. Kent kanyonlarının geometrik özellikleri dış mekan ısı durumu üzerinde etkiye sahiptir. Bu yüzden çalışmada sıcak-nemli Adana kent dokusunda yer alan Kurtuluş Mahallesi'ndeki kent kanyonlarının uydu görüntüleri aracılığı ile ısı durumlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın yöntemi 4 basamaktan oluşmaktadır. (i) Landsat 8'den elde edilen termal görüntüler aracılığı ile çalışma alanı yer yüzeyi sıcaklık (YYS) durumu belirlenmiştir. (ii) Çalışma alanındaki kent kanyonları geometrik özelliklerine (yönelim ve bina yüksekliği/sokak genişliği oranı) göre sınıflanmıştır. (iii) YYS ve geometrik özellikler arasındaki ilişki istatistiksel olarak saptanmıştır. (iv) Bulgular doğrultusunda kent planlarına yansıtılabilir öneriler geliştirilmiştir. Çalışmada en düşük YYS'ye sahip olan alanlar gölge oranının yüksek olduğu derin kent kanyonları ve yoğun kanopi dokusuna sahip yeşil alanlar olarak belirlenmiştir (34,0-35,5 °C). En yüksek YYS'ye sahip alanlar ise güneş maruziyetinin yüksek ve gölge oranının düşük olduğu istasyon alanı, stadyum, vb. kentsel mekanlardır (36,5-37,2 °C). Derin kanyonlarda D-B yönelimli alanlar K-G yönelimli alanlardan daha düşük YYS'ye sahip olarak istatistiksel olarak ayrılmaktadır ($p<0.05$). Sığ ve orta derin kanyonlarda ise D-B yönelimli alanlar, K-G yönelimli alanlardan daha yüksek YYS'ye sahip olarak istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermektedir ($p<0.05$).

Anahtar kelimeler: Kent kanyonu, En-boy oranı, Yönelim, Yer yüzeyi sıcaklığı, Sıcak-nemli kent

Abstract

Cities have been formed by buildings and streets in urban spaces, defined as city canyons. The geometrical characteristics of canyons affect outdoor thermal conditions. Therefore, this study uses satellite images to determine the thermal conditions of city canyons in the Kurtuluş Neighborhood, which is located in hot-humid Adana city. The study methodology consists of four steps: (i) determination of the land surface temperature (LST) by Landsat 8 thermal images; (ii) classification of canyons according to their geometric characteristics, including orientation and aspect ratio; (iii) determining the statistical relationship between LST and geometric characteristics; and (iv) developing suggestions for future city plans. The study results show that the lowest LSTs (34.0-35.5 °C) were determined in deep canyons with a high shadow ratio and green spaces with dense canopy layers. In contrast, the highest LSTs (36.5-37.2 °C) were determined in the canyons, where the sun exposure is high, and the shade ratio is low (spaces, train stations, stadiums, etc.). In deep canyons, E-W oriented areas have lower LST than the N-S oriented canyons, and these canyons are statistically distinguished ($p<0.05$). On the contrary, in shallow and medium-deep canyons, E-W oriented canyons have a higher temperature than the N-W canyons, and these canyons have statistically significant differences ($p<0.05$).

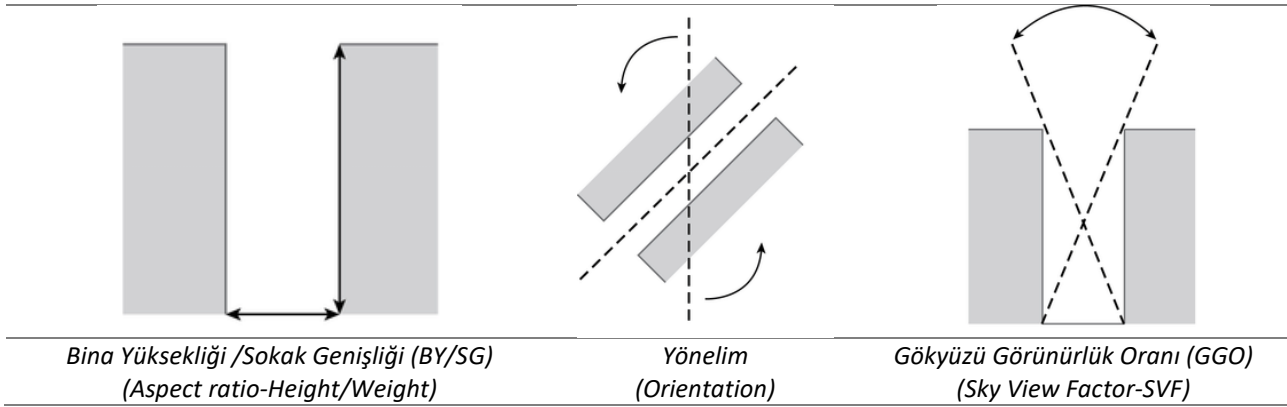
Keywords: Urban canyon, Aspect ratio, Orientation, Land surface temperature, Hot-humid city

1. Giriş

Günümüzde göç olgusunun artması hızlı kentleşmeye ve beraberinde hızlı nüfus artışına sebep olmuştur. Kentsel mekanın genişlemesi, geçirimli yüzeylerin geçirimsiz alanlara dönüşmesi ve antropojenik etkilerin beraberinde getirdiği olumsuzluklar kentsel ısı adası olgusunu ortaya çıkarmıştır. Kent iklimindeki değişiklikler sadece iklimsel koşulları olumsuz etkilememiş, kentli insanın günlük yaşantısını da olumsuz etkilemeye başlamıştır. Bu durum kentsel mekanlarda mikro düzeydeki iklimsel çalışmaların önemini arttırmıştır. İklimsel çalışmalar sadece dış mekan insan konforunu temel almakla kalmayıp, iç mekan konforunu, yapıların ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarındaki enerji tasarruflarını, iklime dayalı tasarım ve planlama prensiplerinin gelişmesine katkıda bulunmuştur (Ali-Toudert vd., 2005; Ali-Toudert ve Mayer, 2006; Andreou, 2013; Johansson, 2006). Kentlerde ise farklı mekanlarda (yeşil alanları, avlular, kamusal alanlar, vb.) kent morfolojisi ve kent geometrisinin dahil edildiği iklimsel çalışmalar hız kazanmıştır. Yeni tesis edilen alanlarda doğru tasarım ve plan stratejileri ile kentsel ısı adası oluşumu engellenebilmektedir. Isı adası çalışmalarında iklimsel faktörler (rüzgar, yağış, hava sıcaklığı, vb.) kontrol edilemeyen özellikler iken, kentin geometrik yapısı, malzeme seçimi, yeşil alan oranı, kullanılan bitki özellikleri gibi unsurlar kentsel ısı adası olgusu üzerinde etkisi olan ve kontrol edilebilen özelliklerdir (Chatzidimitriou ve Yannas, 2017; De ve Mukherjee, 2018; Sharmin vd., 2017).

Yoğun kent dokusu içerisinde yüksek binaların ve yolların oluşturduğu kent formu kent kanyonu olarak tanımlanmaktadır. Binaların iki boyutlu enine kesiti ile tahmin edilen temel bir geometrik birimdir (Oke, 1988). Kent kanyonlarının geometrisi, ısı adalarının belirlenmesinde ve yaya termal konforu çalışmalarında önemli rol oynamaktadır. Bu tanımdan yola çıkarak farklı bina yüksekliklerinin, farklı yol genişliklerinin, hakim rüzgar yönüne göre farklı kanyon konumlarının dış mekan ısı konforu üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi çalışmaların temel konusu olmuştur (Alchapar ve Correa, 2016; Ali-Toudert ve Mayer, 2007; Alobaydi vd., 2016; Emmanuel ve Krüger, 2012; Lobaccaro ve Acero, 2015; Martins vd. 2012; Targhi ve Van Dessel, 2015).

Kent kanyonu çalışmalarında kullanılan kentsel geometri parametreleri bina yüksekliği/sokak genişliği (BY/SG), gökyüzü görünürlük oranı (GGO) ve yönelimdir (Şekil 1). BY/SG oranı bir kentsel kanyonda gelen ve giden güneş radyasyonunu, radyasyon akışını ve rüzgar sirkülasyonunu etkileyen en önemli kentsel geometri parametresidir. Gökyüzü görüş oranı (GGO), yerdeki belirli bir noktadan görülebilen gökyüzü miktarının, yatay bir yüzeyin kapsadığı potansiyel olarak mevcut gökyüzü yarıkürsesine oranı olarak tanımlanır (Oke, 1982). Boyutsuz ve 0 ile 1 arasında değişen GGO, kentsel ısı adası etkisini ölçmek için önemli bir parametredir (Sharmin vd., 2017).



Şekil 1. Kentsel geometri parametreleri (Boeters vd., 2012)

Pek çok çalışmada kanyonların dış mekan ısı durumlarının BY/SG oranı, GGO ve yönelime göre nasıl değiştiği incelenmiştir. Fakat literatürde farklı kentsel tasarım unsurlarının (bitkilendirme, su yüzeyi, gölge elemanları, vb.) kanyon dış mekan ısı durumunu nasıl etkilediğini inceleyen çalışmalarda yaygın bir şekilde yer almaktadır. Kentsel alandaki süs havuzları, fiskiyeler veya göl, nehir gibi su kaynakları varlığı, farklı gölge miktarına sahip farklı taç genişliği ve dokudaki bitki varlığı, gölge elemanları ve yüzey malzemelerindeki farklılıklar (albedo farklılıkları) kanyon ısı durumunu etkileyen diğer fiziksel unsurlardır. Çalışmalar geometrik özellikler ve tasarım unsurlarının birini veya birkaçının birleşimini kullanarak kanyon ısı durumu değerlendirmişlerdir (Tablo 1).

Tablo 1. Kent kanyonu ile ilgili yapılmış çalışmalar

YAZAR	ÇALIŞMA ALANI	İKLİM BÖLGESİ	DÖNEMİ	İKLİMSEL KONFOR					
				Bitkilendirme	Su yüzeyi	Albedo	Gölge elemanları	BY/SG	Yönelim
Ali-Toudert vd., (2005)	Freiburg-Almanya	Sıcak-Kurak	Yaz	X					X
Johanson (2006)	Fas	Sıcak Kurak	Yaz-Kış	X			X		X
Ali-Toudert ve Mayer (2006)	Freiburg-Almanya	Sıcak-Kurak	Yaz	X					
Ali-Toudert ve Mayer (2007)	Cezayir	Sıcak-Kurak	Yaz	X				X	X
Emmanuel ve Fernando (2007)	Kolombo-Sri Lanka	Tropik	Yaz			X			
Martins vd., (2012)	Petrolia-Brezilya	Tropik-Yarı Kurak	Yaz	X					X
Andreou (2013)	Yunanistan	Sıcak-Kurak	Yaz					X	
Paolini vd., (2014)	Milano-İtalya	Sıcak-Nemli	Yaz				X	X	
Targhi ve Van Dessel (2015)	Amerika	Sıcak-Nemli	Yaz			X			
Lobaccaro ve Acero (2015)	Bilbao-İspanya	Ilıman	Yaz	X		X		X	X
Alabaydi vd., (2016)	Irak	Sıcak-Kurak	Yaz					X	
Alchapar ve Correa (2016)	Arjantin-Güney Amerika	Sıcak-Kurak	Yaz	X		X		X	X
Chatzidimitriou ve Yannas (2017)	Yunanistan	Sıcak-Nemli	Yaz-Kış					X	X
Sharmin vd., (2017)	Dhaka-Bangladesh	Sıcak-Nemli	Yaz					X	
De ve Mukherjee (2018)	Hindistan	Ilık-Nemli	Yaz-Kış					X	

Çalışmalar genellikle dış mekan aktivitelerinin yoğun gerçekleştirildiği yaz dönemi için gerçekleştirilmiştir. Bunun temel sebeplerinden birisi yaz mevsiminin güneşlenme süresinin kış mevsimine göre uzun olmasıdır. Fakat kış döneminin yoğun ve uzun geçirildiği bölgeler için her iki dönemi değerlendiren çalışmalarda bulunmaktadır. BY/SG oranı ve GGO'ya ek olarak optimum ısı durumunun sağlanması veya geliştirilmesinde alanın sahip olabileceği farklı tasarımsal özelliklerde dikkate alınmıştır. Bu özelliklerin alandaki varlığı veya yokluğu, oransal olarak artış veya azalışları kanyon ısı konforunu etkilemektedir. Bitki, su yüzeyi ve gölge elemanları varlığının alandaki oransal artışları kanyon ısı konforunu olumlu yönde etkilemektedir. BY/SG oranı ve yönelim ise kanyonun güneş maruziyeti veya sahip olduğu gölge oranını ile ilişkilendirildiği için uygun oran ve yönelim kanyon konforunu olumlu etkilemektedir. Ayrıca farklı malzeme kullanımından kaynaklı olabilecek sıcaklık farklılıklarının belirlenmesinde yüzey malzemelerinin albedo değerleri incelenmiş ve iklime uygun olabilecek malzemeler belirlenmiştir. Bu etkileri tespit etmede mikroiiklimsel simülasyon programları (ENVI-met, Rayman, SkyHelios, Ecotech vb.) kullanılmıştır. Simülasyon programlarının dahil edildiği bu çalışmalar genellikle 1x1 m ile 5x5 m çözünürlüklü ve küçük alanlar için uygulanan (sokak, meydan, vb.) senaryo bazlı çalışmalardır. Bu çalışmaların yanısıra kanyon ısı adası etkisinin belirlenmesinde uzaktan algılama verilerinin (LANDSAT veya MODIS) temel alındığı çalışmalardan da faydalanılmıştır. Özellikle ısı adası tespit çalışmalarında termal uydu görüntülerinden faydalanılmıştır. Fakat bu çalışmalar daha düşük çözünürlüklü ve nispeten büyük alanları (mahalle, ilçe, kent, vb.) içeren çalışmalardır (Unal Cilek, 2021, Unal Çilek 2022).

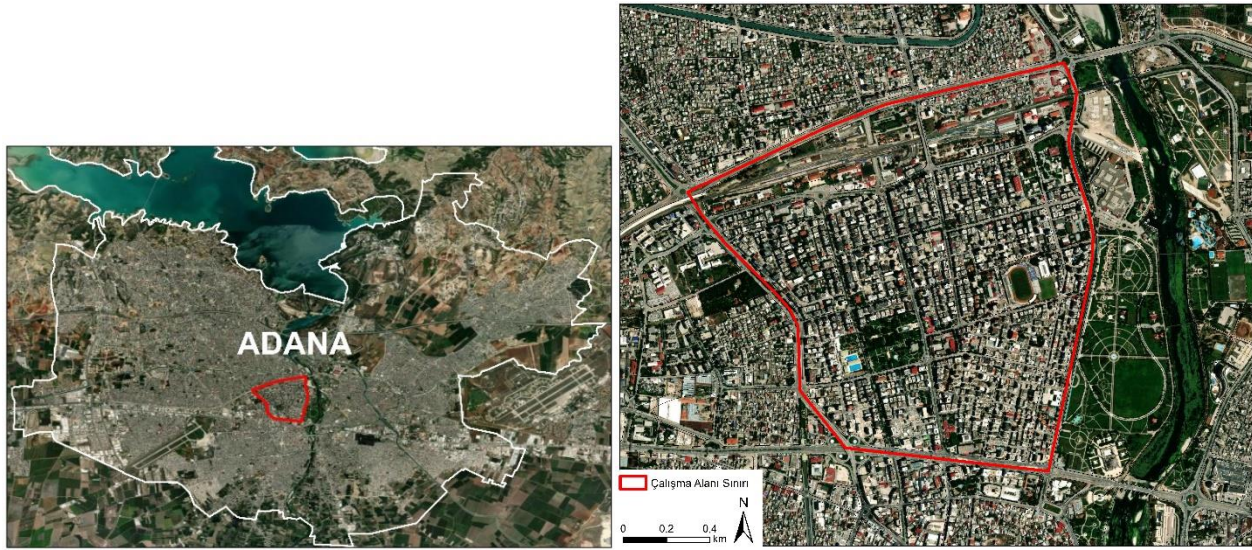
Adana kenti son yıllarda hızlı kentleşme ile birlikte arazi örtüsü değişiminin yoğun yaşandığı illerden birisidir. Özellikle kenti çevreleyen tarım alanları artan nüfusun konut ihtiyacını karşılayabilmek için zaman içerisinde konut alanlarına dönüşmüştür. Bu durum her ne kadar kent insanının barınma ihtiyacını karşılasa da kentin daha farklı çevresel problemlerle karşılaşmasına yol açmıştır. Bunlardan bir tanesi kentsel ısı adası etkisinin kentte yoğun bir şekilde hissedilmesidir (Unal Cilek ve Cilek, 2021). Adana kenti tipik Akdeniz iklimine sahip kentlerden birisidir. Sıcak-nemli iklimi ile özellikle yaz döneminde hava sıcaklığı ortalama 30-35°C ve nem oranı %80'lerde seyretmektedir (MGM, 2020). Güneşlenme süresinin 12-13 saat olması ile kent dış mekan aktiviteleri için uzun bir periyoda sahip olmakla birlikte iklimsel koşullar bu durumu kısıtlamaktadır. Fakat bu kısıtı kentin morfolojik özellikleri ile avantaja dönüştürmek mümkündür. Kentlerin morfolojik özellikleri yani uygun bina yüksekliği/sokak genişliği oranının belirlenmesi, binaların hakim rüzgarı engellemeyecek şekilde ve güneşlenme yönünün dikkate alınarak konumlanması dış mekan ısı durumunu etkileyecektir. Adana kenti gibi dış mekan olanaklarından faydalanmak için uzun bir periyoda sahip kentlerde sıcak iklimden kaynaklı olabilecek olumsuzlukların en az düzeye indirgenmesinde kent morfolojisi önemlidir.

Bu yüzden çalışmada farklı geometrilere sahip kent kanyonlarının ısı durumlarının uydu verileri aracılığı ile tespit edilmesi ve sıcak-nemli Adana kenti için uygun olabilecek morfolojik özelliklerin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Çalışma Alanı

Çalışma alanını olarak Adana kent merkezinde yer alan Kurtuluş Mahallesi seçilmiştir. Tarihi kent merkezinin kuzeyinde konumlanan bu alan 1940 yılında yürürlüğe giren Jansen planı ile biçim kazanmıştır. Zamanla yoğunluğu artmış ve 1980'li yıllardan sonra mekansal karakteristikleri günün koşullarına uyum gösteren bir yapılaşma süreci yaşamıştır. Günümüzde yüksek katlı yapılaşmaların yer aldığı alanda doğu-batı ve kuzey-güney yönelimli akslar ile izgara plan sistemi benimsenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışma alan sınırları-Kurtuluş Mahallesi

Çalışma alanının yer aldığı Adana kenti tipik Akdeniz iklimi özelliklerini yansıtmakta olup yazları sıcak ve kurak, kışları ılık ve yağışlıdır. Köppen-Geiger iklim sınıfına göre kentin bulunduğu bölge Csa (Kış ılık, yazı çok sıcak ve kurak Akdeniz iklimi) olarak belirlenmiştir (Bölük, 2016). Kış mevsiminin en soğuk ayı ortalama 9 °C ile Ocak ayı iken, en sıcak ayı 28 °C ile Ağustos ayıdır (Tablo 2). En sıcak dönemde kentteki bağıl nem %80 ve üzerinde seyretmektedir (MGM, 2020). Bu dönemde güneşlenme süresinin uzun, rüzgar hızı ve esme sayısının yetersiz olmasından dolayı bireylerin dış mekan aktivitelerinde konforlu ortam bulmalarını engellemektedir (Altunkasa, 1987).

Tablo 2. Adana kenti uzun yıllar (1929-2019) iklim verileri (MGM, 2020)

ADANA	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ortalama Sıcaklık (°C)	9.5	10.5	13.4	17.5	21.7	25.6	28.2	28.7	26.1	21.6	15.8	11.2	19.1
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	14.8	16.1	19.4	23.7	28.2	31.7	33.9	34.7	33.1	29	22.6	16.7	25.3
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	5.2	6	8.2	11.8	15.7	19.7	22.9	23.3	20.1	15.7	10.7	6.9	13.8
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	4.6	5.3	6.1	7.2	9.1	10.6	10.8	10.4	9.1	7.5	5.9	4.4	9.1
Ortalama Toplam Yağışlı Gün Sayısı	10.6	10.1	9.6	8.6	6.3	2.9	0.9	0.7	2.6	5.4	6.9	10.2	74.8
Aylık Toplam Yağış Ortalaması (mm)	110	89.7	65.1	51.1	47.1	20.5	6.2	5.5	17.6	42.4	71.1	121.2	647.5
Ortalama Bağıl Nem (%)	67	68	66	68	72	78	72	81	62	60	63	67	66
En Düşük Bağıl Nem (%)	11	10	2	3	4	5	8	2	3	5	7	12	2
En Yüksek Sıcaklık (°C)	26.5	28.5	32	37.5	41.3	42.8	44.4	45.6	43.2	41.5	34.3	30.2	45.6
En Düşük Sıcaklık (°C)	-8.1	-6.6	-4.9	-1.3	5.6	<9.2	11.5	14.8	9.3	3.5	-4.3	-4.4	-8.1

Çalışma alanı olarak bu alanın seçilmesinin temel sebepleri, doğu-batı ve kuzey-güney yönelimli kent kanyonlarına sahip olması, bina kat yüksekliklerinin çalışma alanı boyunca değişkenlik göstermemesi ve karşılaştırma yapılabilmesi için düzenli bir veri altyapısı oluşturacak olmasıdır.

2.2 Veriler

Çalışma alanına ait sayısal veriler (kat yüksekliği, bina konumları, yol genişlikleri, alan kullanımları) Adana Büyükşehir Belediyesi'nden temin edilmiştir.

Çalışmada, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen uzun yıllar (2001-2021) iklim verileri, Adana kenti için en sıcak dönemin tespit edilmesinde kullanılmıştır. En sıcak dönemin belirlenmesindeki temel amaç, bu dönem için belirlenen optimum koşulların diğer sıcak dönem koşulları altında da uygun olabileceği düşüncesidir. Bu yüzden kent kanyonlarının yer yüzeyi sıcaklık durumlarının değerlendirilmesinde en sıcak döneme ilişkin uydu verilerinden faydalanılmıştır. Adana kenti için en sıcak dönem Ağustos ayı olarak belirlendiği için 2021 yılı Ağustos ayına ilişkin görüntüler Landsat 8 Operasyonel Arazi Görüntüleyici (OLI) ve Termal Kızılötesi Sensör (TIRS) aracılığı ile elde edilmiştir. Fakat çalışma uydu görüntülerinin periyodu ve gün içerisindeki geçiş saatinden dolayı bazı kısıtlamalara sahiptir. Bu kısıtlamalardan birincisi uydu periyodunun 16 gün olmasıdır. İklim verileri doğrultusunda elde edilen en sıcak gün 5 Ağustos olarak tespit edilmesine rağmen buna en yakın olan görüntü tarihi 2 Ağustos'a ait veriler (Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1 LC08_L1TP_175034_20210802_20210811_01_T1) çalışmada kullanılmıştır. Çalışmadaki ikinci kısıt ise uydu geçiş saatidir. Güneşin gün içerisindeki hareketinden kaynaklı olarak gün içerisinde farklı sıcaklık, gölge ve yansıma değerleri oluşmaktadır. Fakat uydu geçiş saatinin 11.15 olmasından dolayı çalışma bu saatteki veriler doğrultusunda ilerlemiştir. Fakat yaz döneminde gün doğumunun erken olması Adana kenti koşulları için saat 11.15'in değerlendirme sonuçlarının anlamlı olabileceği öngörüsünü oluşturmuştur. Çalışmadaki üçüncü kısıt ise görüntü çözünürlüğüdür. Landsat TIRS bantları 100 m yersel çözünürlüğe sahiptir. Fakat çalışmada bu çözünürlük kaba olacağı için United States Geological Survey (USGS) tarafından geliştirilen yeniden örnekleme yöntemiyle (kübik enterpolasyon) veriler 30 m çözünürlüğe dönüştürülmüştür. Analizlerde ArcGIS Pro yazılımı kullanılmıştır. Son olarak kanyon termal konforu üzerinde etkisi olan albedo farklılıkları bu çalışmada ihmal edilmiştir. Çalışma alanı sınırları içerisinde yer alan binalar, yaya yolları ve taşıt yollarında malzeme farklılığı bulunmamaktadır. Bu sebeple aynı alan kullanımındaki albedo farklılıklarından kaynaklanacak yansıma farklılıkları göz ardı edilmiştir (örnek: bina renklerinden kaynaklanan yansıma değeri farklılıkları). Uydu görüntüsü çözünürlüğünden dolayı bu farklılıkların algılanması mümkün olmamakla birlikte, albedo değerlerinde farklılık olmaması sonuçların geometrik özellikler doğrultusunda yorumlanması için avantaj oluşturmaktadır.

2.3 Yöntem

- Çalışma alanı yer yüzeyi sıcaklığının (YYS) veya Land Surface Temperature (LST) Landsat-8 TIRS uydu verisi aracılığı ile elde edilmesi
- Kent kanyonlarının geometrik özelliklerinin belirlenmesi (yönelim ve yükseklik/genişlik oranı)
- Farklı kent kanyonlarındaki yönelim ve BY/SG oranlarına göre yer yüzeyi sıcaklık farklılıklarının istatistiksel ilişkisinin ANOVA aracılığı ile ortaya koyulması,
- Bulgular doğrultusunda ısı durumu iyileştirmeye yönelik sonuç ve önerilerin geliştirilmesi

2.3.1 YYS Verilerinin Üretilmesi

Kentsel alanda yapılan çalışmalarda YYS kentsel ısı adası etkisi ve yüzey-atmosfer ilişkisinin belirlenmesinde önemli bir parametredir (Dickinson, 1994; Zhou vd., 2011; Mallick vd., 2013). Kentsel dokudaki termal değişkenlerin kentin fiziki yapısı ve yeryüzü özelliklerine göre nasıl farklılaştığını belirlemede yardımcı olur. Yüzey albedolarından kaynaklı farklılıklar uydulardaki kızılötesi sensörler aracılığı ile sıcaklık değerine dönüştürülürler (Dash vd., 2002). YYS hesaplamak için Landsat 8 OLI/TIRS verilerinden yararlanılmıştır. Bu verilerden YYS elde etmek için bir dizi hesaplama yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalar sırasıyla:

1. Uydu görüntüsündeki sayısal numaraların atmosfer üstü (TOA) spektral yansıma dönüşümü (Eşitlik 1),

$$TOA(L) = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

Eşitlikte L (watt/m²*ster*µm) atmosfer üstü parlaklığını, M_L bandlara özel çarpısal yeniden ölçeklendirme faktörünü, A_L bandlara özel ilave ölçeklendirme faktörünü ve Q_{cal} düzeltilmiş sayısal numaraları ifade eder.

2. K1 ve K2 sabitleri kullanılarak spektral yansıma değerinin parlaklık sıcaklık (brightness temperature) değerine dönüştürülmesi (Eşitlik 2),

$$BT = (K_2 / (\ln(K_1 / L) + 1)) - 273.15 \quad (2)$$

BT, TOA parlaklık sıcaklığı, $K_1 = 774.8853$ (watt/(m² * ster * µm)) ve $K_2 = 1321.0789$ (Kelvin) kalibrasyon sabitleridir.

3. Kentsel ve kırsal yüzey özelliklerinden kaynaklanan farklılıkların göstergesi olan Normalize edilmiş fark bitki örtüsü indeksinin (NDVI) oluşturulması (Eşitlik 3),
NDVI verisinden bitki örtüsü oranı tahmin edilerek yer yüzeyinin emisyonunu ölçmek için bir girdi parametresi olarak kullanılır.

$$NDVI = (Yakın\ kızıl\ ötesi\ band - Kırmızı\ band) / (Yakın\ kızıl\ ötesi\ band + Kırmızı\ band) \quad (3)$$

4. NDVI ile yüksek oranda ilişki bulunan bitki örtüsü oranının (P_v) belirlenmesi (Eşitlik 4),

$$P_v = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2 \quad (4)$$

5. Bitki örtüsü oranı ile ilişkili Emisyon oranının (ϵ) hesaplanması (Eşitlik 5),

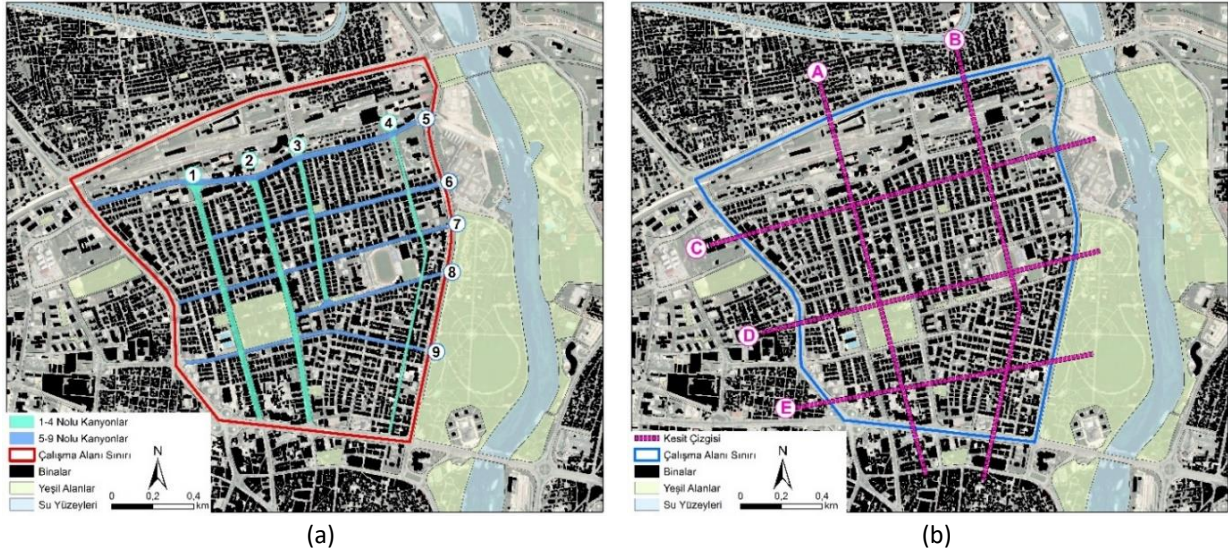
$$\epsilon = 0.004 * P_v + 0.986 \quad (5)$$

6. TOA parlaklık sıcaklığı ve bitki örtüsü emisyon oranı kullanılarak YYS'nin hesaplanmasıdır (Eşitlik 6) (Türkyılmaz ve ark., 2020, Ünal Çilek, 2022).

$$YYS = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * Ln(\epsilon)) \quad (6)$$

2.3.2 Kent Kanyonlarının Geometrik Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışma alanında toplam 9 adet kent kanyonu değerlendirme yapılmak için belirlenmiştir. Bu kanyonlar taşıt ve yaya trafiğinin yoğun olduğu arterler dikkate alınarak belirlenmiştir. Ayrıca kanyonların belirlenmesinde karşılaştırma yapabilmek için farklı geometrik özelliklere sahip olmalarına özen gösterilmiştir. Çalışma alanı sınırları içerisinde genel olarak bina kat yükseklikleri benzer iken, sokak genişlikleri farklıdır. Kanyonların farklı yönelime sahip olmaları da çalışma için önemlidir. Belirlenen 9 adet kanyondan 4 adeti Kuzey-Güney yönelimli iken (1-4 no'lu), 5 adeti ise Doğu-Batı yönelimine (5-9 no'lu) sahiptir. Kanyonların hem kanyon hattı boyunca hem de diğer kanyonlarla olan sıcaklık farklılıklarının karşılaştırılabilmesi için çalışma alanından 3 yatay 2 dikey kesit alınmıştır (Şekil 3a). Kesit çizgileri kent kanyonlarını en iyi şekilde yansıtabilecek noktalardan geçirilmiştir (Şekil 3b). Kesit hatlarının belirlenmesinde şunlara dikkat edilmiştir: Kesit hatlarının kanyonları dik kesecek ve bina morfolojisini yansıtacak hatlardan geçirilmesine özen gösterilmiştir. Örneğin A kesitinin 5, 6, 7 ve 9 no'lu kanyonları dik kesmesi gerekir iken, A kesiti ile aynı yönelime sahip yani A kesitine paralel 1 veya 2 no'lu kanyonlar ile çakışmaması gerekmektedir. Ayrıca çalışma alanında kent için önemli törenlerinde düzenlendiği ve yaklaşık 60.000 m² büyüklüğündeki Atatürk Parkı'na komşu olan kanyon parçalarında sıcaklık farklılıklarının olabileceği düşüncesi ile kesit çizgilerinin bu yeşil alandan geçmesine de özen gösterilmiştir. Çalışma kentsel geometri parametrelerinden bina yüksekliği/sokak genişliği oranı (BY/SG) ve yönelim kent kanyonlarının kategorize edilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3. Değerlendirmeye alınan (a) kanyonlar ve (b) kesit hatları

2.3.3 İstatistiksel Analizler

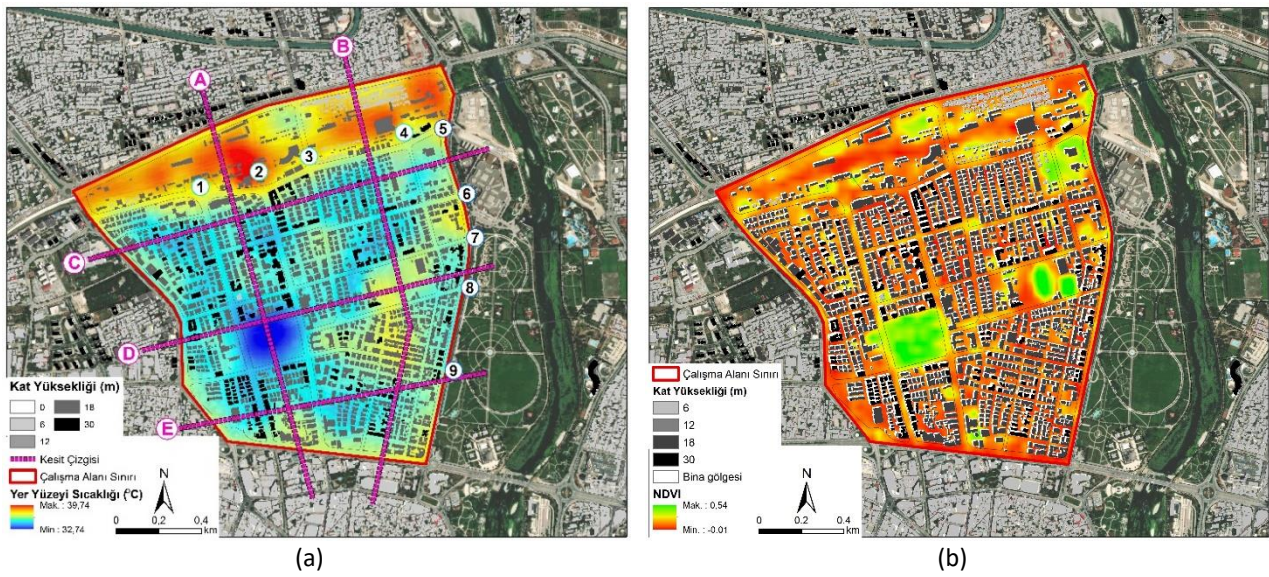
Çalışmada farklı yönelim ve BY/SG oranına sahip kent kanyonlarının sıcaklık farklılıklarının karşılaştırılmasında istatistiksel analizlerden faydalanılmıştır. İlk olarak farklı kanyon geometrilerine ait YYS verileri uydu görüntülerinden tespit edilerek bir veri seti oluşturulmuştur. Belirlenen kesitlerdeki kanyon noktalarına ait YYS değerleri bağımlı değişken, yönelim ve BY/SG oranı bağımsız değişken olarak belirlenmiştir. İkinci olarak ANOVA (varyans analizi) kent geometrileri ve YYS verilerinin karşılaştırılması için kullanılmıştır. ANOVA, değişkenlerin istatistiksel farklılığını analiz etmek için kullanılan en yaygın yöntemlerden birisidir. Fakat analizleri gerçekleştirmeden önce değişkenlerin normallik (Kolmogorov-Smirnov testleri, Q-Q grafikleri ve histogram karşılaştırmaları) ve homojenlik varsayımlarının (Levene testi) test edilmesi gerekmektedir (Ferguson, 1972; Bartesaghi Koç vd., 2018; Geletič vd., 2019). Bu yüzden veri setinin normallik ve homojenlik testi gerçekleştirilmiştir. ANOVA belirlenen kanyon gruplarının YYS değerlerindeki farkın anlamlılığı test ederken ($p < 0.05$), hangi grup ya da grupların farklılığına neden olduğu belirlemez. Bu yüzden farklı geometrik özelliklere sahip kanyonlarda sıcaklık farklılığının hangi özellikten kaynaklandığının istatistiksel olarak belirlenmesinde post-hoc analizler kullanılmıştır. Eşit varyans durumunda kullanılacak post-hoc istatistikler genellikle çoklu ikili karşılaştırmalar ve çoklu aralık testleridir (Kayri, 2009). Bu çalışmada her bir kanyon grubunun diğer gruplarla tek tek karşılaştırılması için çoklu ikili karşılaştırma yöntemi kullanılmıştır. YYS değerindeki farklılığın kent kanyonlarına göre nasıl değiştiğini belirlemek için kullanılan çoklu karşılaştırma yöntemi Tukey-HSD testidir. Bunun nedeni, grup varyansları eşit olduğunda Tukey HSD testinin en çok tercih edilen istatistiksel yöntem olmasıdır (Chen vd., 2020)

3. Bulgular

Çalışmada ilk olarak çalışma alanına ait YYS haritası elde edilmiştir. 2 Ağustos 2021'de saat 11.15'e ait Landsat 8 OLI/TIRS görüntülerinin gerekli hesaplamalar sonucunda YYS haritası oluşturulmuştur (Şekil 4a). Buna göre çalışma alanında en yüksek sıcaklık 39,7°C iken, en düşük sıcaklık 32,7°C'dir. Bitki varlığı YYS değerini etkileyen faktörlerden birisidir. Bunun temel sebebi bitki örtüsünün yeryüzüne ulaşan elektromanyetik enerjiyi diğer alanlardan daha fazla miktarda absorbe etmesidir. Çalışmada yüksek sıcaklığa sahip alanlar genellikle güneş maruziyetinin yüksek olduğu, kanopi örtüsünün olmadığı yapısal alanlardır. Diğer yandan vejetasyona sahip alanların sıcaklık değerleri diğer alanlardan daha düşük sıcaklığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Ağaçların güneş ışığını toprağı ısıtmadan yakalama ve buharlaşma yoluyla çevrelerini soğutma yetenekleri vardır. Ağaçlar, kentsel alanda gölge oluşturması ve evapotranspirasyon sağlaması ile yüksek sıcaklıkların azalmasına destek olarak kentsel ısı adası oluşumunu önlemektedir. Ancak, bu katkının düzeyi bitki türü, taç yapısı, yaprak büyüklüğü ve rengi ile tekstürüne göre değişmektedir. Kent parklarının soğutma etkisi bitki örtüsünün yoğunluğundan ve yaprakların renginden büyük ölçüde etkilendiği belirtilmektedir (Demircioğlu Yıldız vd., 2018). Yaprak sıcaklığı, bir dizi anatomik, fiziksel ve biyolojik olaya bağlı olan yaprak seviyesindeki enerji dengesinin sonucudur. Ortaya çıkan yaprak sıcaklığı, yaprak sıcaklığı bitkinin kendisi için olduğu kadar bitkinin çevresindeki çevre için de önemli sonuçlara sahiptir. Burada renk ve albedo değerine bağlı olarak yansıma değerlerinde (absorbe etmede) farklılık olması çim alanlar ve ağaçlar arasında yüksek yüzey sıcaklığı farklılıklarına neden olmaktadır. Bu yüzden özellikle yoğun kanopi dokusuna sahip geniş taçlı ağaçların kullanıldığı alanlar (Atatürk Parkı, 1, 2 ve 5 no'lu kanyonlar) daha

düşük YYS değerine sahip iken, çim dokuya sahip kent stadyumu, tren garı çevresi yüksek YYS değerine sahip olmuşlardır. Buna göre çalışma alanındaki kanopi yoğunluğu yüksek Atatürk Parkı'nın YYS değerleri 32,7-35,3°C arasında değişkenlik göstermektedir ve bu alan çalışma alanındaki en düşük sıcaklık değerine sahiptir. Ayrıca Atatürk Parkı'na komşu yerleşim dokusunda da düşük YYS değerleri gözlemlenmiştir (34,0-35,6°C). Çalışma alanının kuzeyinde yer alan Adana Tren Garı hattının bulunduğu bölgede ise YYS değerleri 36,0°C ile 39,7°C arasında değişkenlik göstermektedir. Konut dokusu içerisinde yer alan, bitki oranının düşük, geçirimsiz yüzey oranının yüksek olduğu alanlarda YYS ortalama 36.8°C'dir (Şekil 4a ve 4b).

YYS değerini etkileyen faktörlerden bir diğeri ise gölgelemedir (Johanson, 2006; Paolini vd., 2014). Bu sebeple çalışmada gölge etkisini incelemek için bina gölge analizleri gerçekleştirilmiştir. Fakat uydu geçiş zamanının günde bir kere olması çalışmanın farklı zaman dilimindeki gölge analiz sonuçları ve YYS değerlerinin kıyas yapılmasına olanak tanımamaktadır. Çalışma bu yönü ile bir kısıtlamaya sahiptir. Bu yüzden çalışmada kullanılan görüntü saati dikkate alınarak gölge analizleri gerçekleştirilmiş ve YYS değerleri yorumlanmıştır. (Şekil 4b). Fakat uydu geçiş saatinde güneşin yeryüzüne düşme açısının dike yakın olmasından dolayı bina gölgelerinin kısa olduğu tespit edilmiş ve YYS değerleri ile ilişkilendirilememiştir. Bu aşamada YYS değerinin düşük çıkmasındaki en önemli faktör kanopi varlığı olarak belirlenmiştir.



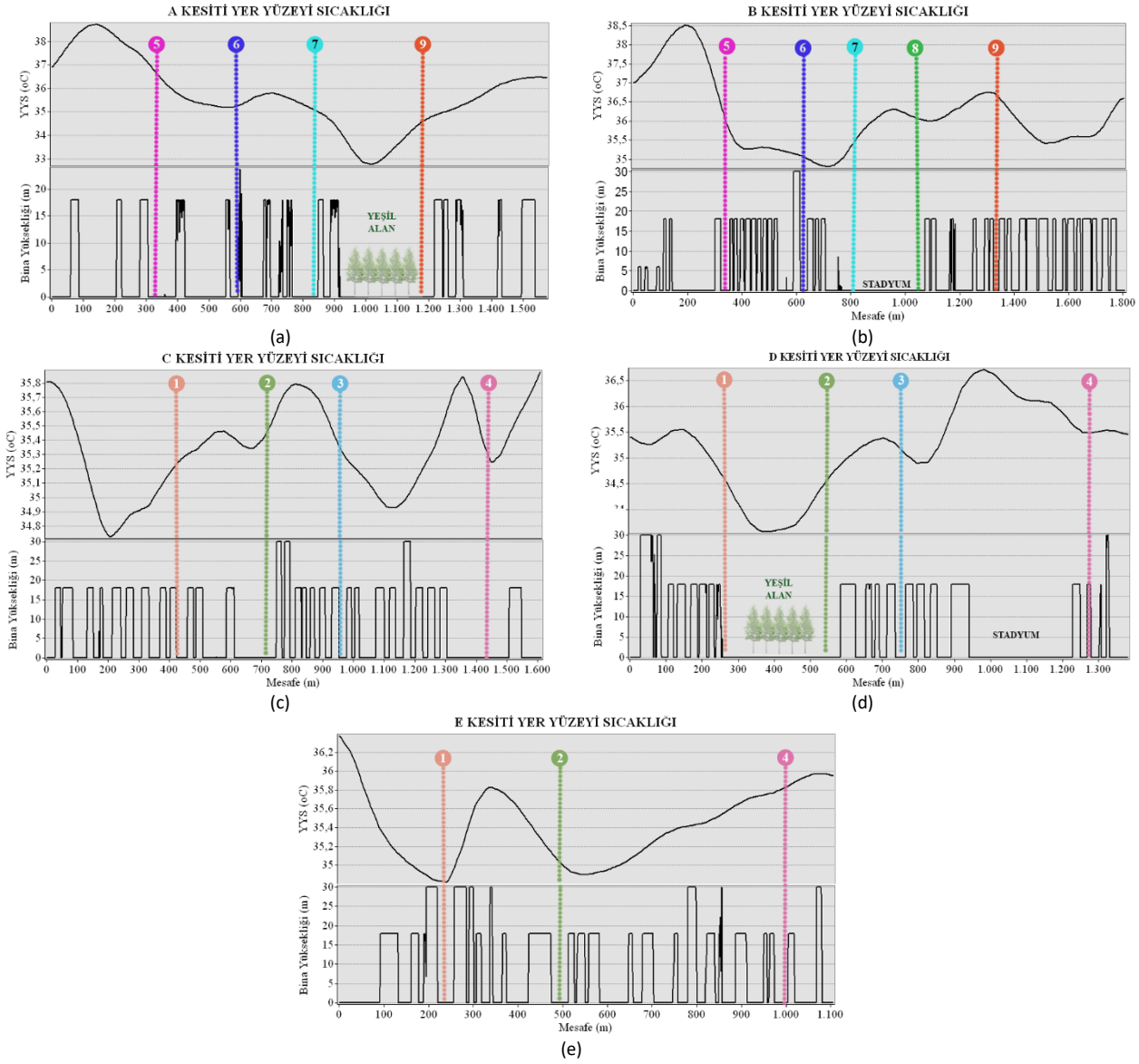
Şekil 4. Kurtuluş Mahallesi (a) YYS haritası, kent kanyonları ve kesitler, (b) NDVI ve bina gölge analizi haritası

Alanda genel olarak konut adaları yoğun dokulu yüksek katlı binalara sahiptir. Kat yükseklikleri genel olarak 6-10 kat arasında değişkenlik göstermektedir. Kanyon genişlikleri ise 15-30 m arasında değişmektedir. Kanyon genişliği kanyon hattı boyunca değişmez iken, bina yükseklikleri aynı kanyon hattı boyunca farklılık göstermektedir. Bu sebeple kanyonun sahip olduğu en düşük, ortalama ve en yüksek sıcaklık değerlerine Tablo 3'te yer verilmiştir.

Tablo 3. Kent kanyonlarının niteliksel özellikleri

Kanyon No	Yönelim	Kanyon Genişliği (m)	YYS (°C)		
			En düşük	En yüksek	Ortalama
1	Kuzey-Güney	30	33,85	37,02	35,06
2	Kuzey-Güney	30	34,35	37,04	35,24
3	Kuzey-Güney	25	35,05	36,54	35,53
4	Kuzey-Güney	15	35,16	36,51	35,76
5	Doğu-Batı	30	35,76	38,03	36,73
6	Doğu-Batı	25	34,68	36,51	35,38
7	Doğu-Batı	20	34,65	36,22	35,37
8	Doğu-Batı	20	34,88	36,72	35,72
9	Doğu-Batı	20	34,27	36,83	35,61

Çalışmanın ikinci aşamasında kesit çizgilerinin geçtiği noktalara göre kanyon profilleri ve YYS değerleri görselleştirilmiştir. Bu aşamada çalışmada belirlenen kesit hatları boyunca YYS değişimleri, kanyon numaraları ve konumları Şekil 5'teki grafiklerde gösterilmiştir. Şekil 5a ve 5b A ve B kesitini yani Doğu-Batı yönelimli kanyonları içerirken, Şekil 5c, 5d ve 5e C, D ve E kesitlerini yani Kuzey-Güney yönelimli kanyonları içermektedir. Konut alanları içerisinde yüksek katlı ve binalar arası mesafenin az olduğu alanlar nispeten düşük YYS değerine sahip olmuştur (ortalama 34-35 °C). A ve B kesitinde 5 ve 6'nolu kanyonlar (Şekil 5a, 5b), E kesitinde ise 1 no'lu kanyon noktası düşük YYS değerine sahip alanlardır (Şekil 5e). Bina arası mesafenin yüksek olduğu, kanopi oranının düşük olduğu alanlar ise yüksek YYS değerine sahiptir. Şekil 5b ve 5d'de Stadyum olarak tanımlanan alanlar, Şekil 5c'de YYS değerindeki zirve noktalar bu alanları ifade etmektedir. Şekil 5a ve Şekil 5d'de yeşil alan olarak tanımlanan bölgeler Atatürk Parkı'nı göstermektedir. En düşük YYS değerine yoğun kanopi dokusuna sahip bu alan ve çevresindeki konut dokusu sahip olmuştur (33-36 °C).



Şekil 5. YYS grafikleri ve kesitleri (a) ve (b) Doğu-Batı yönelimli kent kanyonları; (c), (d), ve (e) Kuzey-Güney yönelimli kent kanyonları

Çalışmada üçüncü aşama istatistiksel analizlerin gerçekleştirilmesidir. Bu aşamada ilk olarak bir veri seti oluşturulmuştur. Burada değerlendirmeye konu olacak noktalar kesit noktaları ile kanyonların kesiştiği noktalardır. Kesişim noktasında yer alan piksel ve bu pikseli çevreleyen 8 pikseldeki (toplam 9 piksel) değerler dikkate alınarak en düşük, en yüksek ve ortalama değerler elde edilmiştir. Aynı kanyon hattındaki farklı BY/SG'den kaynaklı YYS değerleri tespit edilmiştir. Bu yüzden bu noktalar kanyon numarası önce kesit ismi sonra gelecek şekilde adlandırılmış ve sayısal veriler bu noktalara göre elde edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4'te çalışma alanında 20 noktaya ilişkin veri elde edilmiştir. ANOVA analizinin yapılabilmesi için veri dağılımlarının homojenliği önemlidir. Bu yüzden ilk önce veri dağılımlarının homojenliği test edilmiştir. Noktaların 11 adeti Kuzey-Güney yönelime sahip iken 9 adeti Doğu-Batı yönelime sahiptir. Bu noktalar yönelimlerine göre gruplandırılarak değerlendirildiğinde homojen dağılım göstermektedir.

Tablo 4. Kent kanyonlarının niteliksel özellikleri

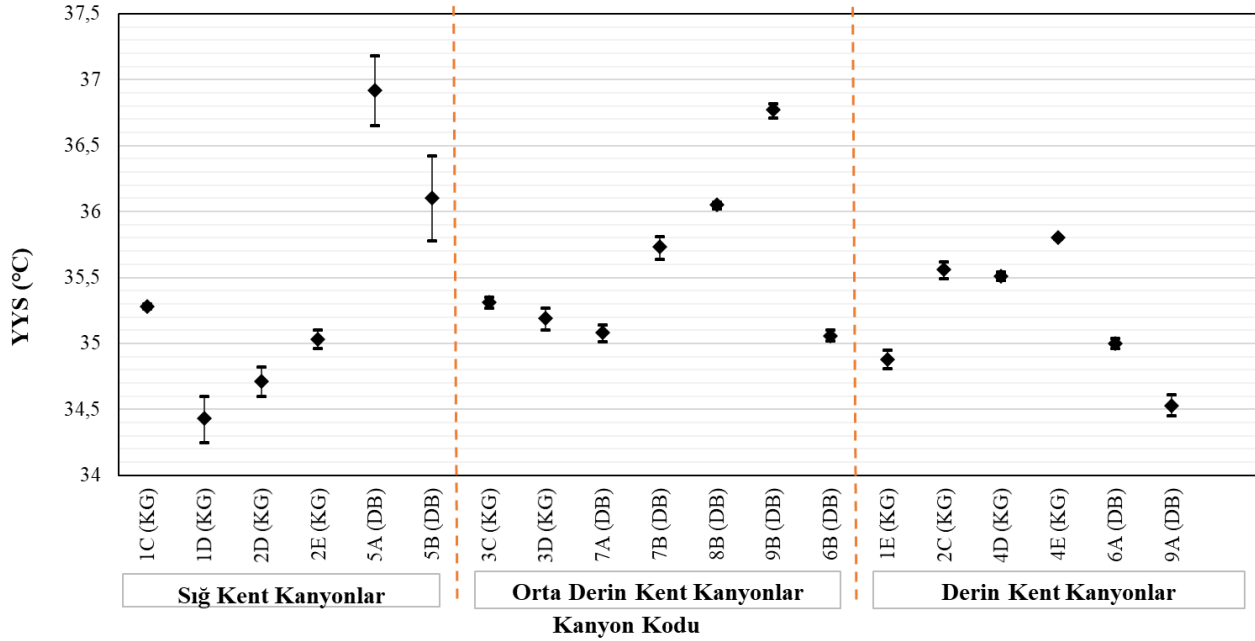
Kanyon Kodu	Yönelim	Sokak genişliği (m)	Bina yüksekliği (m)	BY/SG	Kanyon Niteliği	Yer Yüzeği Sıcaklığı (°C)		
						En düşük	En yüksek	Ortalama
1C	K-G	30	18	0,6	Siğ	35,26	35,3	35,28
1D	K-G	30	18	0,6	Siğ	34,25	34,6	34,43
1E	K-G	30	30	1,1	Derin	34,81	34,95	34,88
2C	K-G	30	30	1,1	Derin	35,49	35,62	35,56
2D	K-G	30	18	0,6	Siğ	34,6	34,82	34,71
2E	K-G	30	18	0,6	Siğ	34,96	35,1	35,03
3C	K-G	25	18	0,72	Orta	35,27	35,35	35,31
3D	K-G	25	18	0,72	Orta	35,1	35,27	35,19
4C	K-G	15	Bina yok	-	-	35,26	35,31	35,29
4D	K-G	15	18	1,2	Derin	35,48	35,54	35,51
4E	K-G	15	18	1,2	Derin	35,79	35,81	35,8
5A	D-B	30	18	0,6	Siğ	36,65	37,18	36,92
5B	D-B	30	18	0,6	Siğ	35,78	36,42	36,1
6A	D-B	25	30	1,2	Derin	34,96	35,04	35
6B	D-B	25	24	0,96	Orta	35,02	35,1	35,06
7A	D-B	20	18	0,9	Orta	35,01	35,14	35,08
7B	D-B	20	18	0,9	Orta	35,64	35,81	35,73
8B	D-B	20	18	0,9	Orta	36,02	36,07	36,05
9A	D-B	20	30	1,5	Derin	34,45	34,61	34,53
9B	D-B	20	18	0,9	Orta	36,71	36,82	36,77

Elde edilen veri setinde 20 adet noktadaki BY/SG oranları tespit edilmiş ve BY/SG oranlarına göre kanyonlar kategorize edilmiştir. Her ne kadar literatürde farklı BY/SG oranları yer alsın da, en sık kullanılan değer aralıkları bu çalışmada kanyon derinliklerini kategorize etmede kullanılmıştır. Literatürde yer alan BY/SG oranları şunlardır: 0,6-siğ ve 1-derin (Shashua-Bar vd., 2004); 0,5-siğ, 1-orta, 2-derin ve 4-çok derin (Ali-Toudert vd., 2005; Ali-Toudert ve Mayer, 2006); 0,6-siğ, 1,0-orta ve 1,3-derin (Andreou, 2013); 0,1, 0,5, 1,75, 2 (Targhi ve Van Dessel, 2015); 0,6, 1,5, 2 ve 2,5 (De ve Mukherjee, 2018). Buna göre 0,0-0,6 oranına sahip kanyonlar "siğ kanyonlar", 0,7-0,9 arasındaki kanyonlar "orta derin kanyonlar", $\geq 1,0$ oranına sahip kanyonlar "derin kanyonlar" olarak sınıflandırılmıştır. Literatürdeki çalışma alanlarının Türkiye dışında yer alması ve bazı bölgelerde binaların gökdelen olması, derin kanyon değerlerinde farklılıklar olmasına yol açmaktadır. Bu yüzden derin kent kanyonlarındaki BY/SG değeri bu çalışmadaki konut tipleri göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Buna göre çalışma alanındaki siğ kent kanyonlarında bina kat yükseklikleri genellikle 6 kat olmakla beraber sokak genişliği 30 m'dir. Orta derin kent kanyonlarında ise kat yüksekliği genellikle 6 katlı olmakla birlikte binalar arası mesafe 20-25 m arasında değişkenlik göstermektedir. Derin kent kanyonlarında bina kat yükseklikleri 10 katlı olmakla beraber sokak genişliği 15-30 m arasında değişmektedir. Sokak genişliğinin düşük bina yüksekliğinin yüksek olduğu alanlarda BY/SG yüksek değer almıştır. Kanyon niteliği açısından da kanyonların dağılımı homojenlik göstermektedir. Değerlendirmeye konu olan kanyonların niteliklerine göre dağılımları 6 adet siğ, 7 adet orta ve 6 adet derin kent kanyonları şeklindedir (Tablo 4).

Homojenlik testi veri setinin ANOVA yapılması için uygunluğunu göstermiştir. Bu aşamadan sonra kategorize edilen kanyonların sıcaklık dağılımlarının yönelim ve BY/SG oranına göre istatistiksel olarak nasıl değiştiği belirlenmiştir. İstatistiksel farklılıkların yorumlanmasında Şekil 6'dan faydalanılmıştır. Şekil 6 belirlenen noktalara ilişkin en düşük, en yüksek ve ortalama değerlere ilişkin bilgiler ile grupların istatistiksel olarak anlamlı farklılığa sahip olup olmadığını göstermektedir. Şekil 6'ya göre siğ kent kanyonlarının sıcaklık dağılımı 34,3°C ile 37,2°C arasında değişkenlik göstermektedir. Buna göre Kuzey-Güney yönelimli kent kanyonlarının sıcaklık dağılımları 34,2°C-35,3°C YYS'ye sahip iken Doğu-Batı yönelimli kent kanyonları 35,7°C ile 37,2°C arasında değişmektedir.

D-B yönelimli sığ kent kanyonları çalışma alanının kuzeyinde istasyona komşu alanda yer almaktadır. Bu alanların güneş maruziyeti yüksek ve gölge oranı düşük olması sebebi ile en yüksek sıcaklığa sahip alanlar olarak tanımlanmıştır. D-B yönelimli kanyonlar K-G yönelimli kanyonlardan 1,5-2°C daha yüksek sıcaklığa sahiptir. Ayrıca K-G yönelime sahip sığ kanyonların YYS değerleri D-B yönelime sahip sığ kent kanyonlarının YYS değerinden istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermektedir ($p<0,05$).

Orta derinliğe sahip kent kanyonlarında da sığ kanyonlarda olduğu gibi K-G yönelime sahip kanyonlar (35,1°C-35,3°C), D-B yönelime sahip kanyonlardan (35,1°C-36,8°C) daha düşük YYS değerine sahiptir. Bu kategoride yer alan noktalardan biri hariç tutulursa, K-G yönelimli kanyonların D-B yönelimli kanyonlardan 1,0-1,5°C daha serin olduğu gözlemlenmiştir. D-B yönelimli kanyonların çalışma alanındaki yüksek YYS'ye sahip alanlardır. Ayrıca bu iki yönelim istatistiksel olarak birbirinden anlamlı farklılık göstermektedir. ($p<0,05$).



Şekil 6. Kanyon niteliklerinin istatistiksel olarak kıyaslanması

Derin kent kanyonlarının sıcaklık dağılımları 34,4°C ile 35,3°C arasında değişkenlik göstermektedir. Genel olarak çalışma alanındaki ortalama YYS değerleri ile paralellik göstermektedir. Sığ ve orta derin kent kanyonlarının aksine derin kent kanyonlarında K-G yönelime sahip alanların D-B yönelime sahip kanyonlardan daha yüksek sıcaklığa sahip olduğu gözlemlenmiştir. D-B yönelimli kanyonlarda özellikle kanyonun güneyinde yer alan yüksek katlı binaların gölgesi D-B yönelimli kanyonları etkilediğinden bu noktalarda kanyon düşük YYS değerine sahip olmuştur. Bu kategoride değerlendirmeye alınan noktalardan biri hariç diğer noktalar istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermektedir.

4. Tartışma

Güncel literatürde sıcak-kurak veya sıcak-nemli iklimdeki kent kanyonlarını değerlendiren pek çok çalışma yer almaktadır. Bu çalışmalar kanyon ısıl durumlarını yerel ölçekte değerlendirerek önerilerde bulunmuşlardır. Az sayıda da olsa bazı çalışmalar yıl boyu kullanıma olanak sağlayabilecek öneriler geliştirebilmek için hem yaz hem de kış dönemi verilerini dikkate almışlardır (Chatzidimitriou ve Yannas, 2017; De ve Mukherjee, 2018; Johanson, 2006). Kent kanyonunu, kent morfolojisi veya kent geometrisi terimleri ile literatürde yer alan çalışmalar genel olarak bina yüksekliği/sokak genişliği oranını (BY/SG) temel almakla birlikte farklı tasarımsal özelliklerin de (albedo, bitkilendirme, yönelim, gölge elemanları) dahil edildiği model sonuçlarını değerlendirmiştir. Bu çalışmada ise model çalışmalarından farklı olarak uydu görüntülerinden faydalanılmıştır. Çalışmaların pek çoğu kentte farklı konumlarda bulunan kanyonları değerlendirirken, bu çalışmada mahalle ölçeğinde uydu görüntüleri kullanılarak kanyon niteliği taşıyan alanların YYS değerlendirmesi yapılmıştır. BY/SG'ye ek olarak albedo değerlerindeki farklılıklardan kaynaklı olabilecek sıcaklık değişimlerini inceleyen Emmanuel ve Fernando (2007) ile Targhi ve Van Dessel (2015) sonuçların yorumlanmasında ortalama ışınım sıcaklığı parametresinden faydalanmışlardır. Tek bir alanda günün farklı saatlerindeki simülasyon sonuçlarını içeren çalışmalarda gündüz saatlerindeki kanyon sıcaklık değerlerinde yönelime göre herhangi bir farklılık gözlemlenmez iken, öğleden sonraki analizlerinde özellikle Doğu-Batı yönelimli kanyonların sıcaklık değerlerinde ciddi artışlar gözlemlenmişlerdir.

Binalardan kaynaklı gölge öğleden sonraki saatlerde Kuzey-Güney yönelimli kanyonların ortalama ışınlam sıcaklığını düşürmüştür. Yani güneş ışınlarının yeryüzü ile doğrudan etkileşimi engellenmekte ve solar radyasyondan kaynaklı sıcaklık artışı binalar tarafından engellenmektedir. Bu çalışmada uydu görüntüsünün yersel çözünürlüğünün bina gölgelerinin tespitinde etkili olmamasından dolayı bina yüksekliklerine göre gölge analizleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre tek bir saatteki (11.15) gölge durumları değerlendirildiğinde güneş açısının dike yakın olmasından dolayı bina gölge boyları kısadır ve kanyon ısıl durumu üzerinde yönelime göre belirgin bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Çalışmada gündüz saati gerçekleştirilen gölge analizi sonuçları önceki çalışma sonuçları ile örtüşmektedir. Öğleden sonraki saatlerde gölge durumu değişmekle birlikte gölgenin YYS değeri üzerindeki değişiminin tespit edilmesinde uydu görüntüleri yetersiz kaldığından çalışmada değerlendirilememiştir. Ancak ileride yapılacak çalışmalarda günün farklı saatlerindeki gölge analizlerinin dahil edilmesi ve kanyon ısıl durum değişikliğinin tespit edilmesi önemlidir. Yüksek albedo değerlerinin yeryüzü sıcaklığını düşürücü etkisi olduğu literatürde yer almaktadır. Bu çalışmada ise uydu görüntüsü çözünürlüğünden kaynaklı albedo etkisi algılanamamaktadır. Fakat çalışmadaki arazi kullanım tiplerinde albedo farklılığının olmaması çalışma sonuçlarını etkilememiştir.

Kent kanyonlarında YYS üzerinde etkili olan bir diğer unsur bitki varlığı veya doğal kanopi varlığıdır (Ali-Toudert vd., 2005; Ali-Toudert ve Mayer, 2007; Johanson, 2006; Lobaccaro ve Acero, 2015; Martins vd., 2012). Bitki varlığı güneş ışınlarının yer yüzeyine ulaşmasına engel olmakta ve ısıl durumu olumlu etkilemektedir. Bu çalışmada ise bitki varlığı ile ilişkilendirilen NDVI hem yeniden örnekleme işleminde hem de kanopi varlığının tespit edilmesinde kullanılmıştır. Literatürde model kullanan çalışmalar bitki türlerinin kanyon sıcaklığı üzerindeki etkilerine değinmişlerdir. Bu çalışmada bitki varlığında tür bazlı analiz yapmak mümkün olmamakla birlikte çim ve ağaç kullanımı olan alanların yansıma değerlerindeki farklılıklardan kaynaklı kanopi varlığı ve YYS'ye etkisi belirlenmiştir. Bitki varlığı gölgeleme ile ilişkilendirilerek YYS değerlerinin yorumlanmasında faydalanılmıştır. Buna göre çalışma alanında yoğun kanopi dokusuna sahip kent kanyonlarının daha düşük sıcaklığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Çim vejetasyonuna sahip alanlar ise yüksek güneş maruziyetinden dolayı yüksek YYS'ye sahiptir. Böylece vejetasyon varlığı YYS'yi etkileyen önemli unsurlardan birisidir.

Literatürde kanyon ısıl durumlarının karşılaştırılmasında en çok kullanılan parametreler BY/SG ve yönelimdir. BY/SG oranı çalışmalarda özellikle derin kanyonlarda farklılık göstermesine rağmen en yaygın kullanılan oranlar bu çalışmada da kanyonların kategorize edilmesinde kullanılmıştır. Literatürde yer alan BY/SG oranları şunlardır: 0,6-sığ ve 1-derin (Shashua-Bar vd., 2004); 0,5-sığ, 1-orta, 2-derin ve 4-çok derin (Ali-Toudert vd., 2005; Ali-Toudert ve Mayer, 2006); 0,6-sığ, 1,0-orta ve 1,3-derin (Andreou, 2013); 0,1, 0,5, 1,75, 2 (Targhi ve Van Dessel, 2015); 0,6, 1,5, 2 ve 2,5 (De ve Mukherjee, 2018). Buna göre bu çalışmada 0,0-0,6 sığ kanyonları, 0,7-0-9 orta derin kanyonları ve 1,0 ve üzeri oranlar ise derin kanyonları göstermektedir. Önceki çalışmalar çalışma sonuçlarını genellikle matematiksel farklılıklara göre yorumlamıştır. Bu çalışmada ise belirlenen kanyon noktalarının YYS değerlerinin karşılaştırılmasında ANOVA analizinden faydalanılmıştır. ANOVA kentsel ısı adası çalışmalarında farklı sınıfların çoklu karşılaştırma yapılmasında yaygın olarak kullanılan istatistiksel yöntemlerden birisidir (Unal Cilek ve Cilek, 2021). Çalışmada derin kanyonlar sığ kanyonlardan, Kuzey-Güney yönelimli kanyonlar Doğu-Batı yönelimli kanyonlardan daha düşük YYS değerine sahiptir. Literatürdeki çalışma sonuçları ile bu çalışma sonuçları benzerlik göstermektedir. Çalışmada uydu görüntüsünün kullanımı çözünürlük, uydu geçiş periyodu gibi özelliklerden dolayı kısıtlamalara sahip olmasına rağmen çalışma sonuçlarının literatür ile uyumu, çalışma yönteminin uygulanabilirliğini göstermektedir. Kuzey-Güney yönelimli kanyonlar Doğu-Batı yönelimli kanyonlardan daha düşük sıcaklığa sahiptir ve istatistiksel olarak anlamlı farklılık göstermektedir. Sığ ve derin kent kanyonlarının YYS değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Mahalle ölçeğinde geometrik yapının dikkate alınması ile elde edilen sonuçlar uzaktan algılama ile çalışma yapan disiplinlere fikir vermesi açısından önemlidir. Fakat sonuçların daha farklı parametreler ve model sonuçları dahil edilerek yorumlanması çalışma alanı özelinde uygulamaya yansıtılabilir sonuçların ortaya çıkmasına yardımcı olacaktır.

5. Sonuç ve Öneriler

Farklı yönelim ve BY/SG' ye sahip kent kanyonlarının değerlendirildiği çalışmada iklimsel açıdan konfora sahip kanyon özelliklerinin sıcak-nemli iklime sahip Kurtuluş Mahallesi örneğinde incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada düşük YYS değerinin hangi özellik veya özelliklerden kaynaklandığının belirlenmesi hedeflenmiştir. Tartışmalar ışığında YYS'yi etkileyen pek çok unsur olmakla beraber bu çalışma için kentsel geometrik özellikler (yönelim, sokak genişliği ve bina yüksekliği) değerlendirmeye alınır iken, yüzey malzemelerinden kaynaklı olabilecek farklılıklar ve gökyüzü görüş oranı değerlendirme dışı tutulmuştur. Çünkü 100 m çözünürlüğe sahip uydu görüntülerinin yeniden örnekleme işlemleri aracılığı ile 30 m çözünürlüklü elde edilen YYS haritasında bu detaylar hassas bir şekilde anlaşılacaktır. Fakat çalışma alanında yoğun bitki örtüsüne sahip yeşil alanlar, açık alanlar, istasyon gibi bölgeler bu çözünürlükte net bir şekilde algılanmaktadır. Bu yüzden bu alanlara ilişkin sıcaklık verilerine çalışmanın bulgular bölümünde yer verilmiştir. Çalışmada K-G yönelime sahip kent kanyonlarının ortalama YYS değerleri karşılaştırıldığında ortalama en düşük değer 34,8 °C ile sığ kent kanyonlarında iken, ortalama en yüksek değer orta (35,2°C) ve derin (35,3°C) kent kanyonlarındadır.

Bu durum D-B yönelimli kent kanyonlarında ise daha farklıdır. YYS değerleri en düşükten en yükseğe doğru 34,7°C ile derin kent kanyonları, 35,9°C ile orta derin kent kanyonları ve 36,5°C ile sığ kent kanyonları şeklinde sıralanmaktadır. Orta derinlikteki kent kanyonlarının genel olarak derin ve sığ kent kanyonlarından daha yüksek YYS değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Kent kanyonlarında termal konforu sağlayan en önemli unsur gölgeleme olarak tespit edilmiştir (Alchapar ve Correa, 2016; Alobaydi vd., 2016; Chatzidimitriou ve Yannas, 2017; De ve Mukherjee, 2018; Paolini vd., 2014; Sharmin vd., 2017). Çalışmada sığ ve orta derin kent kanyonlarındaki K-G yönelime sahip kanyonların, D-B yönelime sahip kent kanyonlarından daha düşük YYS değerine sahip olduğu ve istatistiksel olarak anlamlı farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum derin kent kanyonlarında ise tam tersidir. K-G yönelimli kanyonlar D-B yönelimli kanyonlardan daha yüksek YYS değerine sahiptir. Bunun temel sebebi gölge analizlerinde gölge boyunun kısa olması yüksek katlı binaların kanyona gölge sağlamamasıdır. Gelecek araştırmaların farklı saatleri de içeren gölge analizleri ve model sonuçlarının eklenmesi gölge etkisinin daha net yorumlanmasına yardımcı olacaktır.

Düşük YYS'ye sahip kent kanyonları derin ve sığ kanyonlarda farklı geometrik özellikler göstermekle birlikte, en önemli unsur vejetasyon varlığı olarak belirlenmiştir. Fakat kentte tüm alanların uygun saptanan özelliklerde tasarlanması mümkün değildir. Bu aşamada kent iklimi ve alan karakteri ile uyum gösterecek tasarım önerilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Özellikle detay çözünürlükte çalışma kolaylığı sağlayan iklimsel modellerden (ENVI-met, Ecotech, SkyHelious, vb.) destek alınarak uygulamaya yansıtılabilecek kentsel tasarım önerilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Model sonuçları ve uydu verilerinin entegrasyonunun sağlandığı çalışmaların gerçekleştirilmesi konforlu kentlerin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Çalışmadaki iklimsel verilerin temini için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne, Adana kentine ait sayısal veriler için Adana Büyükşehir Belediyesi'ne teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Alchapar, N. L., & Correa, E. N. (2016). The use of reflective materials as a strategy for urban cooling in an arid "OASIS" city. *Sustainable Cities and Society*, 27, 1-14.
- Ali-Toudert, F., Djenane, M., Bensalem, R., & Mayer, H. (2005). Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. *Climate Research*, 28(3), 243-256.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2), 94-108.
- Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, 81(6), 742-754.
- Alobaydi, D., Bakarman, M. A., & Obeidat, B. (2016). The impact of urban form configuration on the urban heat island: the case study of Baghdad, Iraq. *Procedia Engineering*, 145, 820-827.
- Altunkasa, M. F. (1987). *Çukurova Bölgesi'nde Biyoklimatik Veriler Kullanılarak Açık ve Yeşil Alan Sistemlerinin Belirlenmesi İlkeleri Üzerinde Bir Araştırma* (Doktora Tezi), Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, Adana.
- Andreou, E. (2013). Thermal comfort in outdoor spaces and urban canyon microclimate. *Renewable Energy*, 55, 182-188.
- Boeters, R., Donkers, S., Lee, D.J., Liem, V., Montazeri, S., van Oostveen, J., & Pietrzyk, P. (2012). *The effect of 3D geometry complexity on simulating radiative, conductive and convective fluxes in an urban canyon* (Student theses). Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aa957e358-0d7d-4f6b-92ea-dccf8d89babc>
- Bölük, E. (2016). *Köppen iklim sınıflandırmasına göre Türkiye iklimi*. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Ankara.
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2017). Street canyon design and improvement potential for urban open spaces; the influence of canyon aspect ratio and orientation on microclimate and outdoor comfort. *Sustainable Cities and Society*, 33, 85-101.
- Chen, Y., Zheng, B., & Hu, Y. (2020). Mapping Local Climate Zones Using ArcGIS-Based Method and Exploring Land Surface Temperature Characteristics in Chenzhou, China. *Sustainability*, 12(7), 2974. doi: 10.3390/su12072974.
- Dash, P., Göttsche, F. M., Olesen, F. S., & Fischer, H. (2002). Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*, 23(13), 2563-2594.

- De, B., & Mukherjee, M. (2018). Optimisation of canyon orientation and aspect ratio in warm-humid climate: Case of Rajarhat Newtown, India. *Urban Climate*, 24, 887-920.
- Demircioğlu Yıldız, N., Aydan, U., Yılmaz, S., & Irmak, M. A., (2018). The effect of the temperature of the surface of vegetation to the temperature of an urban area. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2(2), 76-85.
- Dickinson, R. E. (1994). Satellite systems and models for future climate change. In Henderson-Sellers, A. (Eds.), *Future Climates of the World: A Modelling Perspective (World Survey of Climatology)* (pp. 16-26), Netherlands: Elsevier Science.
- Emmanuel, R., & Fernando, H. J. S. (2007). Urban heat islands in humid and arid climates: Role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. *Climate Research*, 34(3), 241–251.
- Ferguson, G. A. (1972). Statistical analysis in psychology and education. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, 135(1), 153-154.
- Geletiç, J., Lehnert, M., Savić, S., & Milošević, D. (2019). Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities. *Building and Environment*, 156, 21-32.
- Johansson, E. (2006). Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, 41(10), 1326-1338.
- Koc, C. B., Osmond, P., Peters, A., & Irger, M. (2018). Understanding land surface temperature differences of local climate zones based on airborne remote sensing data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(8), 2724-2730.
- Lobaccaro, G., & Acero, J. A. (2015). Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate*, 14, 251-267.
- Kayri, M. (2009). The multiple comparison (post-hoc) techniques to determine the difference between groups in researches. *Firat University Journal of Social Science*, 19(1), 51-64.
- Mallick, J., Rahman, A., & Singh, C. K. (2013). Modeling urban heat islands in heterogeneous land surface and its correlation with impervious surface area by using night-time ASTER satellite data in highly urbanizing city, Delhi-India. *Advances in Space Research*, 52(4), 639-655.
- Martins, T., Adolphe, L., & Krause, C. (2012). *Microclimate effects of urban geometry on outdoor thermal comfort in the Brazilian tropical semi-arid Climate*. Retrieved from <http://plea-arch.org/ARCHIVE/websites/2012/files/T01-20120111-0010.pdf>
- MGM. (2020, Eylül 9). Adana iklim verileri. Retrieved from <https://www.mgm.gov.tr/?il=Adana>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24.
- Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical geography*, 12(4), 471-508.
- Paolini, R., Mainini, A. G., Poli, T., & Vercesi, L. (2014). Assessment of thermal stress in a street canyon in pedestrian area with or without canopy shading. *Energy Procedia*, 48, 1570-1575.
- Sharmin, T., Steemers, K., & Matzarakis, A. (2017). Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 34, 293-308.
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. *Energy and Buildings*, 31, 221-235.
- Targhi, M. Z., & Van Dessel, S. (2015). Potential contribution of urban developments to outdoor thermal comfort conditions: The influence of urban geometry and form in Worcester, Massachusetts, USA. *Procedia engineering*, 118, 1153-1161.
- Unal Cilek, M. (2021). Outdoor Thermal Comfort Indicators and Indices. In L. G. Kayalar & F. Celik Aslan (Eds.), *Academic Research and Reviews in Architecture, Planning and Design Sciences* (pp. 19-40), Ankara: Duvar Publishing.
- Unal Cilek, M., & Cilek, A. (2021). Analyses of land surface temperature (LST) variability among local climate zones (LCZs) comparing Landsat-8 and ENVI-met model data. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102877.
- Unal Cilek, M. (2022). Kentsel Yüzey Isı Adalarının Belirlenmesinde Yer Yüzey Sıcaklık Verilerinin Kullanımı. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 33, 213-222.
- Zhou, W., Huang, G., & Cadenasso, M. L. (2011). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102(1), 54-63.

Sakarya Nehri'nin İnhisar (Bilecik) Çevresindeki 6 Yıllık Arazi Kullanımı Değişiminin Uzaktan Algılama Tabanında İncelenmesi

Investigation of 6-Year Land Use Change of Sakarya River Around İnhisar (Bilecik) using Remote Sensing

Coşkun Güneş^{1*}, Hakan Uyuçgil²

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve CBS Anabilim Dalı, Eskişehir/Türkiye.

²Eskişehir Teknik Üniversitesi, Yer ve Uzay Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

***Sorumlu yazar:**

Coşkun Güneş
coskungunes@eskisehir.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1111906

Yayın süreci

Geliş tarihi: 01.05.2022

Kabul tarihi: 06.09.2022

Basım tarihi: 18.09.2022

Özet

Güneybatıda Söğüt (Bilecik), kuzeydoğuda Yenipazar (Bilecik) ilçeleriyle sınırlanan çalışma alanının merkez-doğusunda İnhisar (Bilecik) yer almaktadır. Sakarya Nehri bölgenin merkezinde Doğu-Batı doğrultusunda yaklaşık olarak 40 km boyunca devamlılık sunmaktadır ve hem kuzeyden hem güneyden drenaj ağlarıyla beslenmektedir. Bölgede ekonomik değeri olan mermer işletmeleri yaygın olarak gözlenmektedir. Bununla birlikte bölgede yer alan İnhisar şelalesi, Harmankaya Kanyonu Tabiat Parkı gibi alanların insan faaliyetlerinin yol açabileceği zararlardan korunması doğal çevre için oldukça önem arz etmektedir. Çalışmanın temel amacı, çevre için önem arz eden doğal yapıların bulunduğu alanları, yer gözlem uydularının sağladığı verilerle bölgesel ölçekte incelemek ve bu alanların zamana bağlı değişimlerini tanımlamaktır. Landsat-8 uydusu görüntüleri, 12.5m çözünürlüklü sayısal yükseklik modeli ve jeoloji haritası çalışmanın ana verilerini oluşturmaktadır. Rastgele orman algoritmasıyla sınıflandırılması yapılan Landsat görüntüleri üzerinden yapılan değişim analizi bulguları jeoloji ve topografya haritaları üzerinde tartışılmıştır. 6 yıllık değişim analizi bulguları yorumlandığında, özellikle Gölpazarı dolaylarında yoğunluk kazanan maden faaliyetlerinin doğusundaki Yenipazar-İnhisar hattına yakınlaşmaması önerilmektedir.

Anahtar kelimeler: Değişim analizi, Landsat-8 uydusu, Uzaktan algılama

Abstract

İnhisar (Bilecik) is located in the center-east of the study area, which is bounded by Söğüt (Bilecik) in the southwest and Yenipazar (Bilecik) in the northeast. Sakarya River, located in the center of the study area, provides continuity in the East-West direction for approximately 40 km and is fed by drains from both the north and the south. Marble enterprises with economic value are widely observed in the region. In addition, it is very important for the natural environment to protect areas such as İnhisar waterfall and Harmankaya Canyon Nature Park in the region from harm that may be caused by human activities. The main purpose of the study is to examine the areas with natural structures that are important for the environment on a regional scale with data provided by earth observation satellites and to define the time-dependent changes of these areas. Landsat-8 satellite images, a 12.5m-resolution digital elevation model and geology map constitute the main data of the study. The results of the change analysis conducted on the Landsat images classified with the random forest algorithm are discussed on the geology and topography maps. When the 6-year change analysis findings are interpreted, it is suggested that the mining activities, which intensified especially around Gölpazarı, should not approach the Yenipazar-İnhisar line in the east.

Keywords: Change detection, Landsat-8 satellite, Remote sensing

1. Giriş

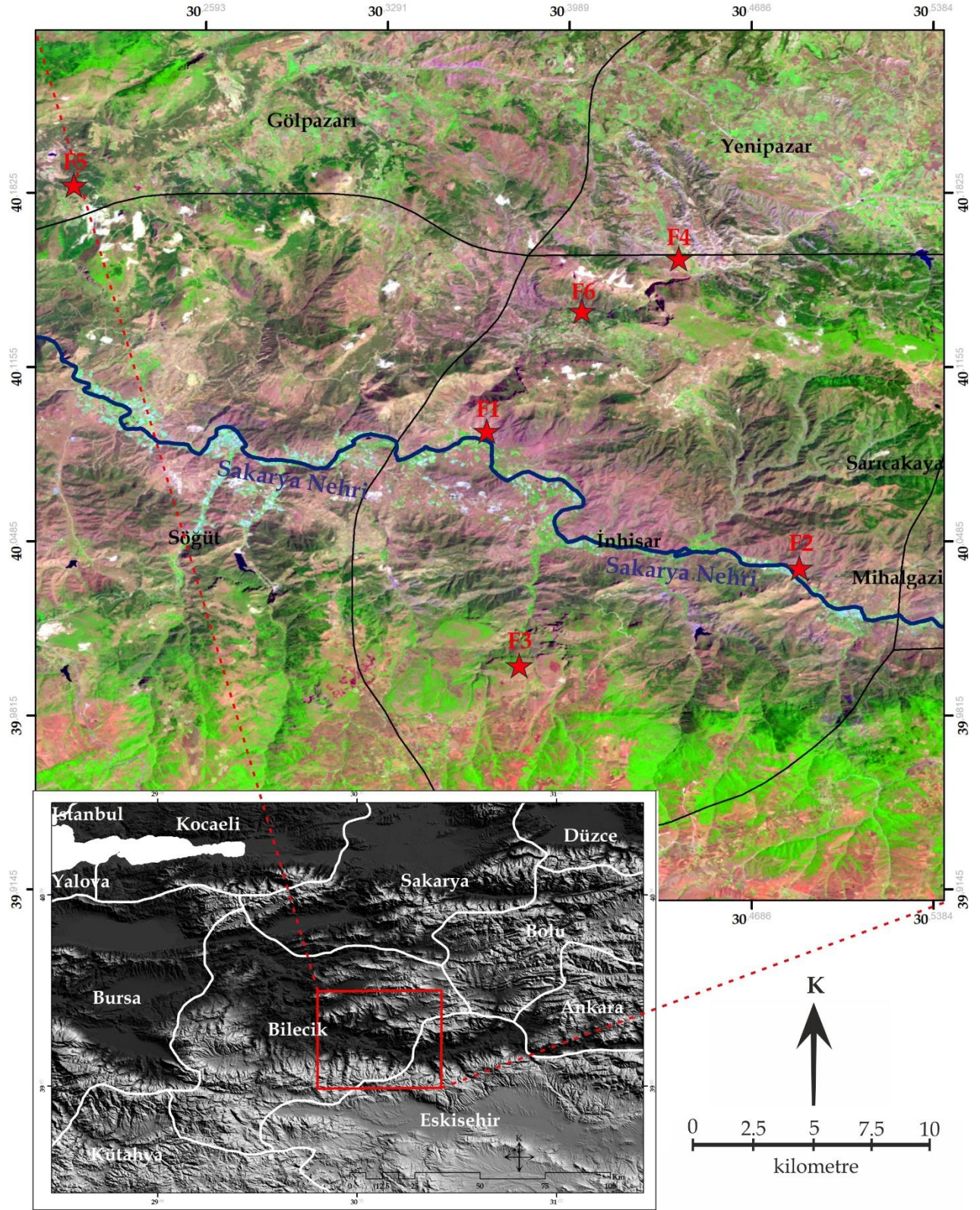
Elektromanyetik spektrumun 0.433-12.50 µm aralığında algılama yapabilen Landsat-8 yer gözlem uydusu, Şubat 2013'ten itibaren aktif bir şekilde yerbilimleri çalışmalarına katkı sağlayan veriler sağlamaktadır. Uzaktan algılamanın temel prensipleri, yer materyallerinin elektromanyetik radyasyona karşı gösterdikleri yansıtma ve soğurma özelliklerine dayanmaktadır. Başka bir ifadeyle; yer materyallerinin elektromanyetik radyasyona karşı gösterdikleri tepkiler, karakteristik spektral imzalarını belirlemektedir. Su kütleleri, sağlıklı bitki örtüsü, farklı litolojik özellikteki kayalar karakteristik spektral imzaları kullanılarak Uzaktan Algılama tabanında tanımlanabilmektedir (Kaplan ve Avdan, 2017; Atak ve Tonyaloğlu, 2020; Kamel vd., 2022). Akarsu, nehir, bitki örtüsü, kayaç jeokimyası gibi parametreler ekosistemin önemli unsurları olmakla birlikte birçok canlı türünün doğal yaşam alanlarını doğrudan etkilemektedir. Landsat-8 uydusunun 30 m konumsal çözünürlüğündeki bantlarına uygulanan sayısal işlemlerle arazi değişimi, bitki örtüsü değişimi, su kütlelerinin azalması veya artması ve yanmış alanların belirlenmesi gibi fark analizleri yapılabilmektedir (Algancı, 2018; Pekkan, 2018; Kaya ve Kaplan, 2021; Yılmaz vd., 2022). Sakarya Nehri'nin İnhisar (Bilecik) doğusundan, Söğüt (Bilecik) dolaylarına kadar BKB-DGD doğrultusunda yaklaşık olarak 40 km devamlılık sunduğu alanın çevresindeki arazi değişimlerini araştırmak bu çalışmanın ana hedefini oluşturmaktadır.

Kılıç ve Başkaya (2018), çalışma alanının içerisinde yer aldığı, Bilecik iline ait agro-turizm potansiyelini değerlendirmişler ve bu bölgeyi agro-turizm için elverişli olarak tanımlamışlardır. Bu çalışmada bölgenin; Osmanlı Devleti'nin kuruluş yeri olması, güvenli olması, geleneksel köy kültürünü koruması, doğal özelliklerini koruması, kırsal alanların organik tarım için elverişli olması, farklı iklim tiplerine bağlı biyolojik çeşitliliğindeki zenginlik ve biyolojik çeşitliliğini bölgenin agro-turizm için güçlü yanları olarak tanımlamışlardır. Uzaktan Algılama, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Genel Jeoloji ilkelerince yürütülen bu çalışma sonucunda da kuzeybatıda Gölpazarı (Bilecik), güneydoğuda Mihalgazi (Eskişehir) arasında yer alan bölgenin doğal ve kültürel zenginliklerinin korunması adına madencilik faaliyetleri yerine ekonomik değerlerin, Kılıç ve Başkaya (2018), tarafından önerilen doğal ve kültürel bütünlüğüyle uyumlu alanlarda geliştirilmesi önerilmiştir.

1.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı kuzeyde Gölpazarı ve Yenipazar (Bilecik), batıda Söğüt (Bilecik), doğuda Mihalgazi ve Sarıcakaya (Eskişehir) ilçeleriyle sınırlanmakta ve yaklaşık 150 km²'lik bir alan kapsamaktadır (Şekil 1). Sakarya Nehri çalışma alanının merkezinden geçmekte, güneydoğuda Mihalgazi-İnhisar-Söğüt hattını izleyerek kuzeybatıya doğru devam etmektedir. Paleotektonik süreç içerisinde Neo-Tetis okyanusunun kapanma sürecinden etkilenmiş olan bölgedeki temel kayaçları Paleozoyik metamorfik birimler oluşturmaktadır (Şengör ve Yılmaz, 1981; Okay ve Tüysüz, 1999; Okay, 2011). Geç Kretase-Paleosen zaman dilimindeki Güneyde Tavşanlı Zonu, kuzeyde Sakarya Zonu arasında gerçekleşen dalma – batma tektonizmasıyla ilişkili olarak bölgede mermer, ofiyolit, metabazit gibi metamorfik kayaçlara ait yüzlekler oldukça geniş alanlar kaplamaktadır (Okay vd., 2020). Paleozoyik-Kretase zaman aralığındaki metamorfik ve magmatik kökenli kayaçlar Paleojen ve Neojen karasal çökelleri tarafından örtülmektedir (Mueller vd., 2019). Sakarya Nehri'nin (Şekil 2: a ve b) doğrultusu boyunca çökelen Kuvaterner alüvyonlar bölgedeki en genç ve güncel oluşuklardır.

Metamorfik kayaçların oluşumunda, sıcaklık ve basınca bağlı olarak değişen kimyasal koşullar kayaç yapısına yeni minerallerin katılmasına veya yapılarındaki minerallerin değişimlerine neden olabilir (Galán, 2006). Özellikle plaka tektoniği gibi geniş ölçekli zonlar boyunca oluşan metamorfik kuşaklar, metalik minerallerin oluşturduğu önemli cevher yatakları içerebildiklerinden ekonomik değere de sahiptirler (Boehlke vd., 1986; Otto vd., 2007; Sarıfakioğlu vd., 2008; Turan, 2018). Karbonatlı tortul kayaçların metamorfizması sonucu oluşan mermerler çalışma alanı kuzeyinde mostralara sunmaktadır. Jeolojik tanımıyla mermer, kireçtaşının metamorfizması sonucu oluşmaktadır ancak karbonat kökenli sert, kompakt kireçtaşları da mermer olarak işletilebilmektedir. Mermer inşaat sektöründe, dekorasyon, süs eşyası yapımı ve heykelticilik gibi alanlarda ekonomik değere sahiptir. Ancak aynı zamanda kompakt yapısı ve bölgenin paleojeolojik koşulları nedeniyle oldukça kırıklı yapıda olan mermer ve kireçtaşları, doğal su kaynakları için rezervuar zonları oluşturmaktadır. Yüksek reflektans değerlerine sahip olan karbonat kökenli kayaçlar uzaktan algılama ortamında bant oranlama, kontrollü ve kontrolsüz sınıflandırma, spektral profillere bağlı sınıflandırma gibi işlemlerle tanımlanabilmektedir (Xie vd., 2015; Radwin ve Bowen, 2021).



Şekil 1. Kırmızı: bant 7, yeşil: bant 5, mavi: bant 2 Landsat-8 renk kompozisyonunda çalışma alanı yer bulduru haritası



Şekil 2. (a) İnhisar batısında Sakarya Nehri'nden bir görünüm (bakış yönü: D, lokasyon Şekil 1: F1), (b) Sakarya Nehri'nin Mihalgazi batısındaki görünümü (bakış yönü: B, lokasyon Şekil 1: F2).

Landsat-8 uydu görüntüleri kırmızı-yeşil-mavi renk uzayında (Kırmızı: Kısadalga kızılötesi bant, Yeşil: Yakındalga kızılötesi bant, Mavi: Mavi bant) renk kompozisyonu altında incelendiğinde (Şekil 1); Özellikle Sakarya Nehri'nin kuzeyinde D-B doğrultusunda kesikli olarak geniş alanlar kapsayan, yüksek reflektans değerine sahip, madencilik faaliyetleri sonrası gelişen, bölgenin doğal yapısıyla kontrast oluşturan yüzeylerin geliştiği göze çarpmaktadır. Bu alanların özellikle Söğüt kuzeyi ve Gölpazarı güneybatısında yoğunluk kazandığı, doğuya doğru kesikli olarak Yenipazar-İnhisar hattına doğru devam ettiği gözlenmektedir. Bölgenin doğal yapısında; doğal su çıkışları, şelaleler (Şekil 3: a), kanyon vadiler gibi doğal tabiat için önemli yapılar yer almaktadır. Çalışma sürecinde tanımlanan ana hedef; madencilik faaliyetlerine bağlı gelişen mostralara, Uzaktan Algılama ortamında elde edilen 6 yıllık fark analizi bulgularıyla ekonomik değerler ve bölgenin doğal tabiatını gözeterik tartışmaktır.



Şekil 3. (a) Sakarya Nehri'ni güneyden besleyen İnhisar Şelalesi doğal su çıkışı (bakış yönü: GB, lokasyon Şekil 1: F3), (b) Kireçtaşlarının aşınması sonucu gelişen Harmankaya kanyonu ve kuzeyden güneye akan Harmanköy deresi (bakış yönü: KD, lokasyon Şekil 1: F4)

2. Yöntem

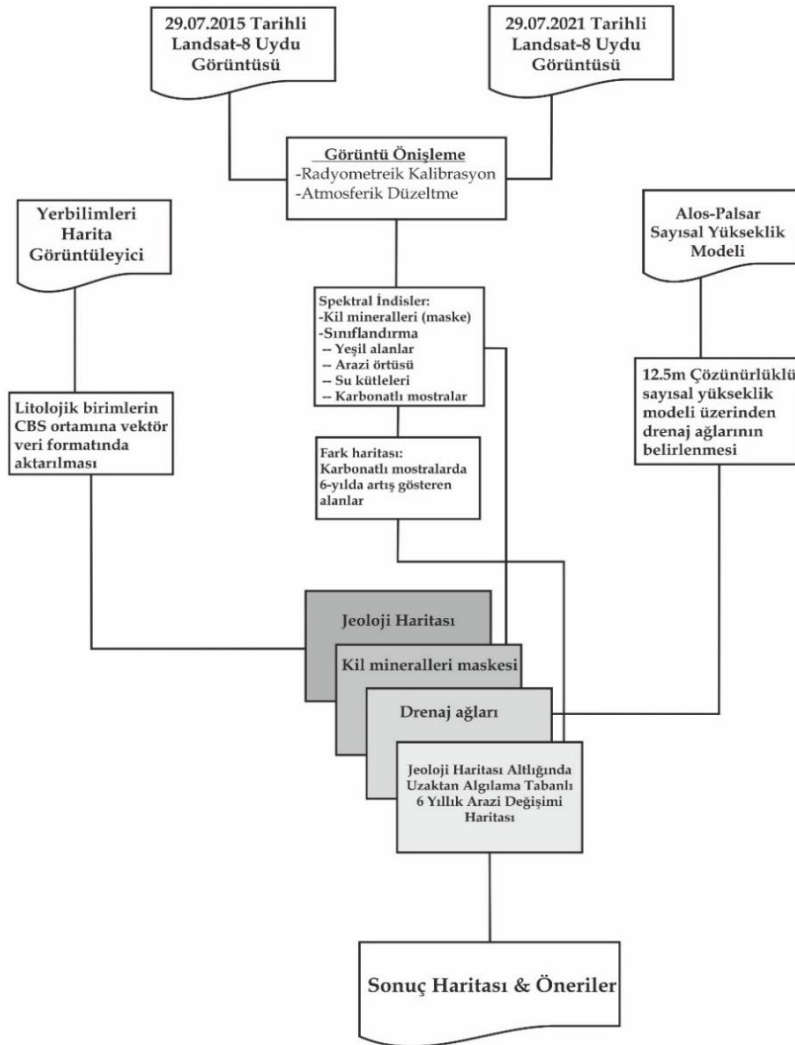
Çalışmanın ana hedefi doğrultusunda tasarlanan yöntem, madencilik faaliyetleri sonucu gelişen yüzeylerin Uzaktan Algılama ortamında tespit edilerek Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanında yorumlanması adımlarını kapsamaktadır. Vektör veri formatına aktarılan litolojik birimlerin yer aldığı bir jeoloji haritası en alt katmanda yer almaktadır. Bu katmanın üzerinde kil minerallerine uygulanan bir maske katmanı yer almaktadır. Coğrafi Bilgi Sistemleri ortamında çizdirilen drenaj ağları ve onun da üzerine gelen 6 yıllık karbonatlı kayaların değişim değerleri sonuç haritasının en üst katmanını oluşturmaktadır. Çalışma sürecindeki ana girdiler; 29.07.2015 ve 29.07.2021 tarihli Landsat-8 Seviye-1 uydu görüntüleri, Alos-Palsar sayısal yükseklik modeli ve jeoloji haritalarından oluşmaktadır.

Landsat-8 uydu görüntülerine radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltme ön işleme adımları uygulanmıştır. Görüntü ön işleme adımları, uydu sensörünün kaydetmiş olduğu dijital değerlerin yüzey reflektans değerlerine dönüşümünü sağlamaktadır. Yüzey reflektans değerleri elde edilen görüntü üzerinde yer materyallerinin sahip olduğu karakteristik spektral imzalar sayesinde bitki örtüsü, su kütleleri, karbonatlı kayalar, kil mineral toplulukları gibi karakteristik yüzey elemanları, uydu görüntülerine uygulanan işlemlerle tespit edilebilmektedir. Bu işlemler için Landsat-8 uydu görüntüsü; 30m konumsal çözünürlükte 8 banta, 15m konumsal çözünürlükte 1 adet pankromatik banta ve termal algılama yapabilen 100m konumsal çözünürlükte 2 adet banta sahiptir. Su kütleleri, 0.85-0.88 mm aralığındaki yakın dalga kızılötesi bantta yüksek soğurma özelliğinden ayrılabilir. Su kütleleri, 0.85-0.88 mm aralığındaki yakın dalga kızılötesi bantta yüksek soğurma özelliğinden ayrılabilir.

Bitki örtüsü ve yeşil alanların tespitinde yakındalga kızılötesi bant ve 0.85-0.88 mm aralığındaki kırmızı bantın oranlanmasından ((yakındalga kızılötesi bant – kırmızı bant) / (yakındalga kızılötesi bant + kırmızı bant)) elde edilen normalize edilmiş fark bitki indeksi (NDVI) yaygın olarak kullanılan bir orandır. Kil mineral toplulukları, 1.57-1.65 mm kısadalga kızılötesi-1 ve 2.11-2.29 mm kısadalga kızılötesi-2 bantlarının (kısadalga kızılötesi-1 / kısadalga kızılötesi-2) oranında düşük reflektans değerlerinden ayırtlanabilmektedir (Drury, 1987). Belirtilen bant oranlarında konumsal çözünürlük 30 m'dir. Kil mineral toplulukları ve karbonat içerikli kayalar birbirlerine yakın soğurma veya reflektans değerlerine sahip olabilmektedir. Çalışmanın ana hedefinde tanımlanan sadece insan faaliyetleri sonucu gelişen yüzeyleri bulmak amacıyla kil mineral toplulukları çalışmanın sonuç haritasında maske katmanı olarak yer almıştır.

12.5 m konumsal çözünürlükte sayısal yükseklik modeli Alos Palsar verilerinden temin edilmiştir. Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanına aktarılan yükseklik modeli üzerinde; vadilerin eğim yönleri, su-akış yönleri ve su-birikim alanları tanımlanarak vektör formatında drenaj ağları çizdirilmiştir.

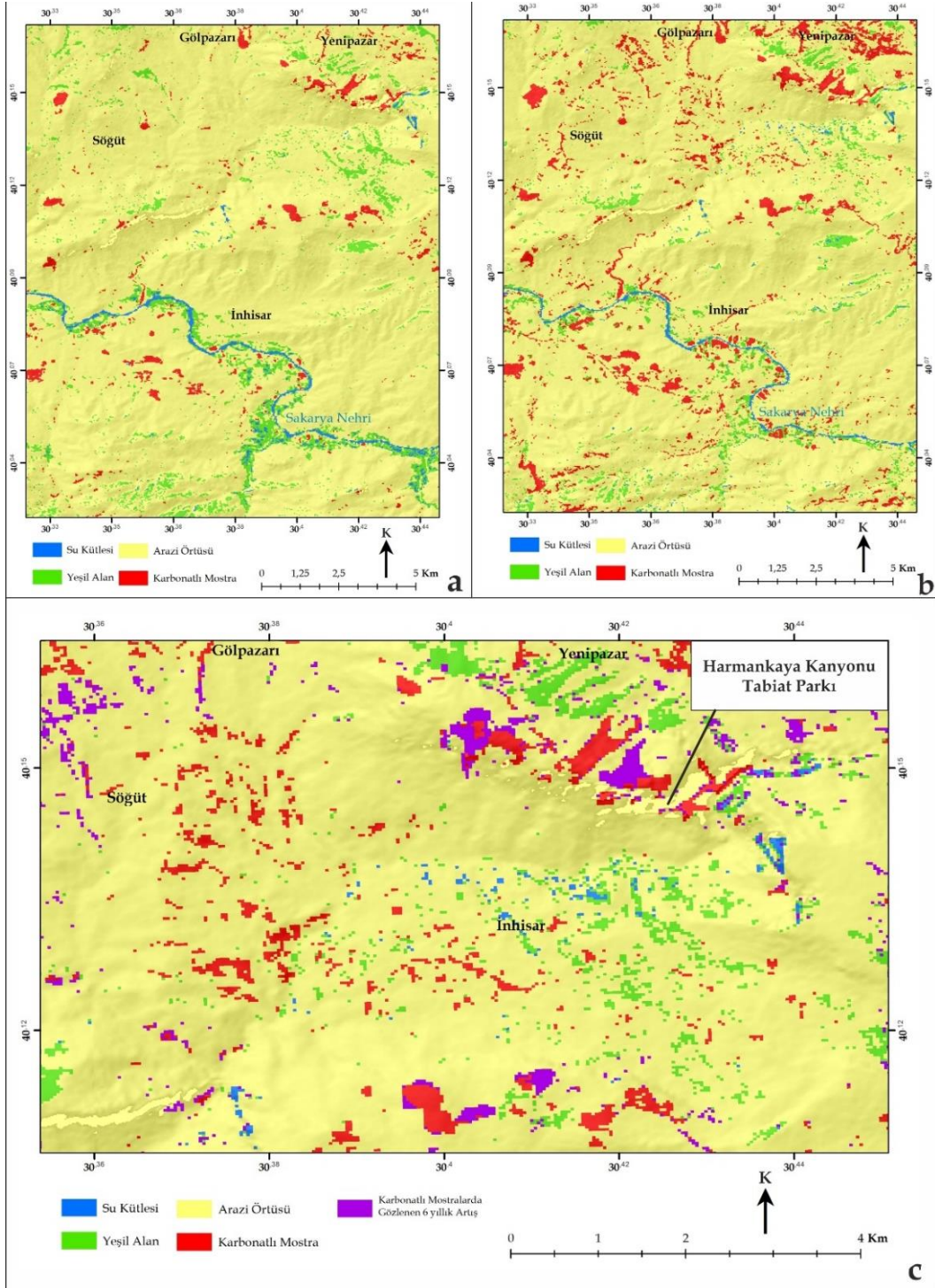
ENVI yazılımında ön işleme yapılan Landsat-8 görüntüleri SNAP yazılımına aktarılmıştır. Hedef alanların ayırtlanması için kullanışlı bir yöntem olan rastgele orman algoritmasıyla (Akar ve Güngör, 2012; Akar ve Görmüş, 2019) görüntüler sınıflandırılmış ve tematik haritalar üretilmiştir. Görüntü sınıflama işlemlerinde Landsat 8'in 30m konumsal çözünürlüklü bantları kullanılmıştır. Temmuz 2015 tarihli görüntüde 4408, Temmuz 2021 tarihli görüntüde 4456 piksel eğitim seti kullanılmıştır. 29 Temmuz 2015 ve 29 Temmuz 2021 tarihli Landsat-8 uydu görüntülerinde; su kütleleri, yeşil alanlar, arazi örtüsü ve karbonatlı mostralarda sınıfları için oluşturulan iki farklı tematik harita üzerinde fark-değişim analizi yapılarak, karbonatlı mostralarda gözlenen artış miktarı tartışılmıştır (Şekil 4). Toplamda 502' şer kontrol noktası atanarak haritaların doğruluk analizleri yapılmıştır. 2015 tarihli tematik haritanın kullanıcı doğruluğu değerleri; Su kütleleri: %83, yeşil alanlar: %80, arazi örtüsü: %90, karbonatlı mostralarda: %76 genel doğruluk %84 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler 2021 tarihli tematik haritada; Su kütleleri: %78, yeşil alanlar: %76, arazi örtüsü: %88, karbonatlı mostralarda: %71 ve genel doğruluk %80 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Çalışma yönteminin şematik gösterimi

3. Bulgular

Yergözlem uydularının sağladığı veriler; jeoloji, kentleşme, iklim değişikliği gibi alanlarda olduğu gibi çevre değişimi çalışmalarına da olanak sağlamaktadır. Sakarya Nehri, Harmankaya Kanyonu Tabiat Parkı, İnhisar Şelalesi gibi çevre için önemli olduğu düşünülen alanların çevresinde yürütülen çalışmada uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri tekniklerinden yararlanılmıştır. Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama uygulamalarının bütünlük olarak kullanıldığı çalışmada anahtar rolü, rastgele orman algoritmasıyla sınıflandırması yapılan 2015 ve 2021 tarihli görüntülerin tematik haritaları oynamaktadır (Şekil 5a, 5b ve 5c).



Şekil 5. (a) Temmuz 2015, (b) Temmuz 2021 tarihli görüntü üzerinden rastgele orman algoritmasıyla sınıflandırılmış tematik harita, (c) Değişim analizi sonucunda karbonatlı mostralarda artış gözlenen alanların tematik gösterimi

Su kütlesi, yeşil alan, arazi örtüsü ve karbonatlı mostralara için belirlenen sınıfların doğruluk analizleri her iki görüntüye atanan, toplam 502'şer noktayla yapılmıştır. Nokta sayılarının belirlenmesinde, Congalton ve Green (2019)'da önerilen "en kötü durum senaryosu" referans alınmıştır. En kötü durum senaryosunda; güvenilirlik aralığının sınıf sayısına oranından elde edilen değer, gerekli doğruluğun karesinin 4 katına bölünerek, sınıflama kontrolü için gerekli nokta sayısı belirlenmektedir. Bu çalışmada güvenilirlik aralığı %85, gerekli doğruluksa %50 olarak seçilmiştir. Temmuz 2015 tarihli görüntüde sınıfların kullanıcı doğrulukları; su kütlesi için %83, yeşil alan için %80, arazi örtüsü için 90, karbonatlı mostra için %76 ve genel doğruluğu %84 olarak belirlenirken (Tablo 1) bu değerler Temmuz 2021 tarihli görüntüde aynı sırayla; %78, %76, %88, %71 ve %80 olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Haritaların kappa tutarlılık katsayıları 0.78 ve 0.72 olarak hesaplanmıştır.

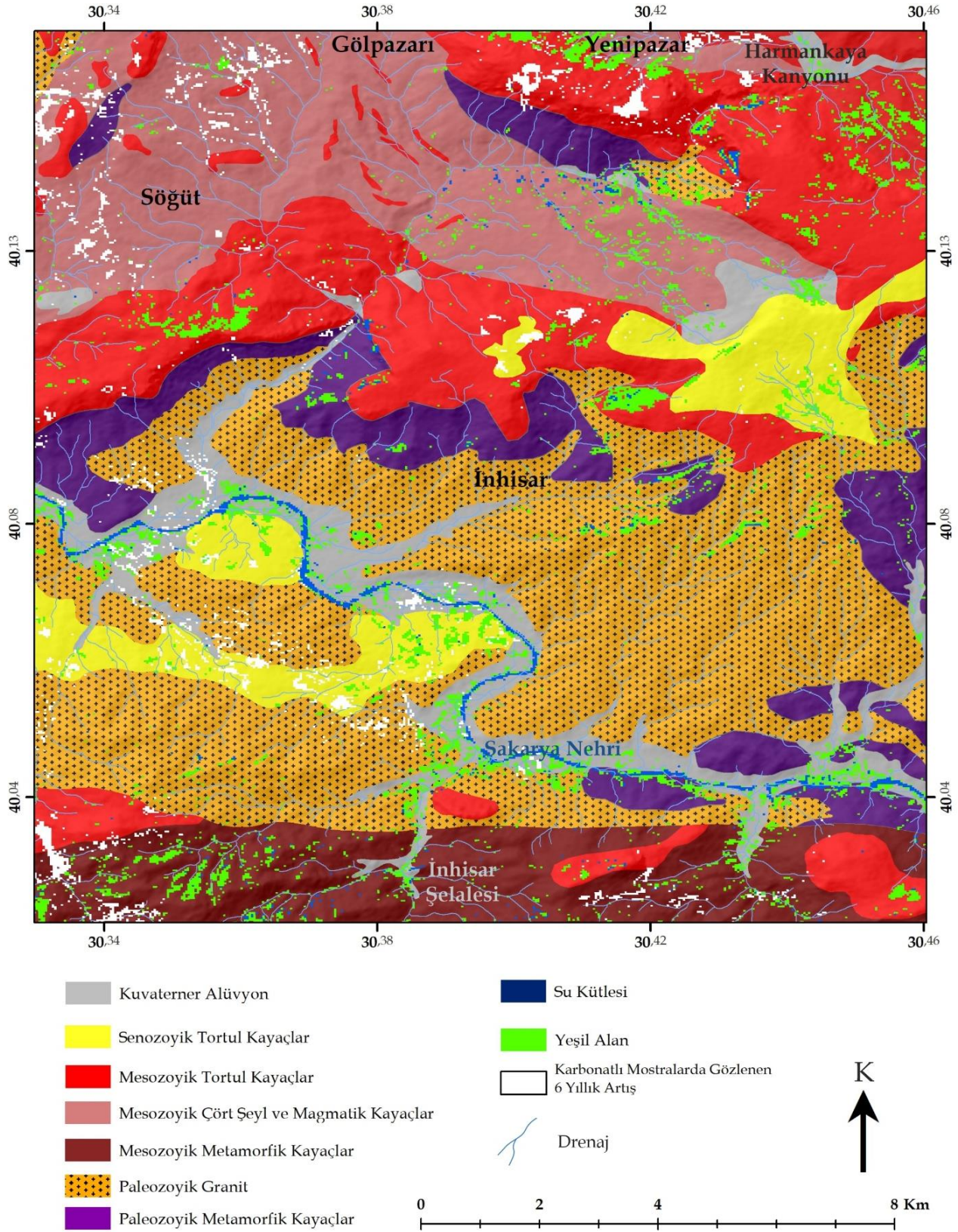
Tablo 1. Temmuz 2015 tarihli görüntüye uygulanan kontrollü sınıflandırma haritasının doğruluk analizi

	Temmuz 2021	Referans Sınıfları				Toplam (Kullanıcı)	Kullanıcı Doğruluğu (%)
		Su Kütlesi	Yeşil Alan	Arazi Örtüsü	Karbonatlı Mostra		
Tahmin Sınıfları	Su kütlesi	92	6	12	0	110	83
	Yeşil Alan	1	80	19	0	100	80
	Arazi Örtüsü	1	14	171	2	188	90
	Karbonatlı Mostra	1	0	24	79	104	76
	Toplam (Üretici)	95	102	226	81	502	
	Üretici Doğruluğu (%)	96	78	75	97		
	Genel Doğruluk (%)	84					
	Kappa Tutarlılık Katsayısı =	0.78					

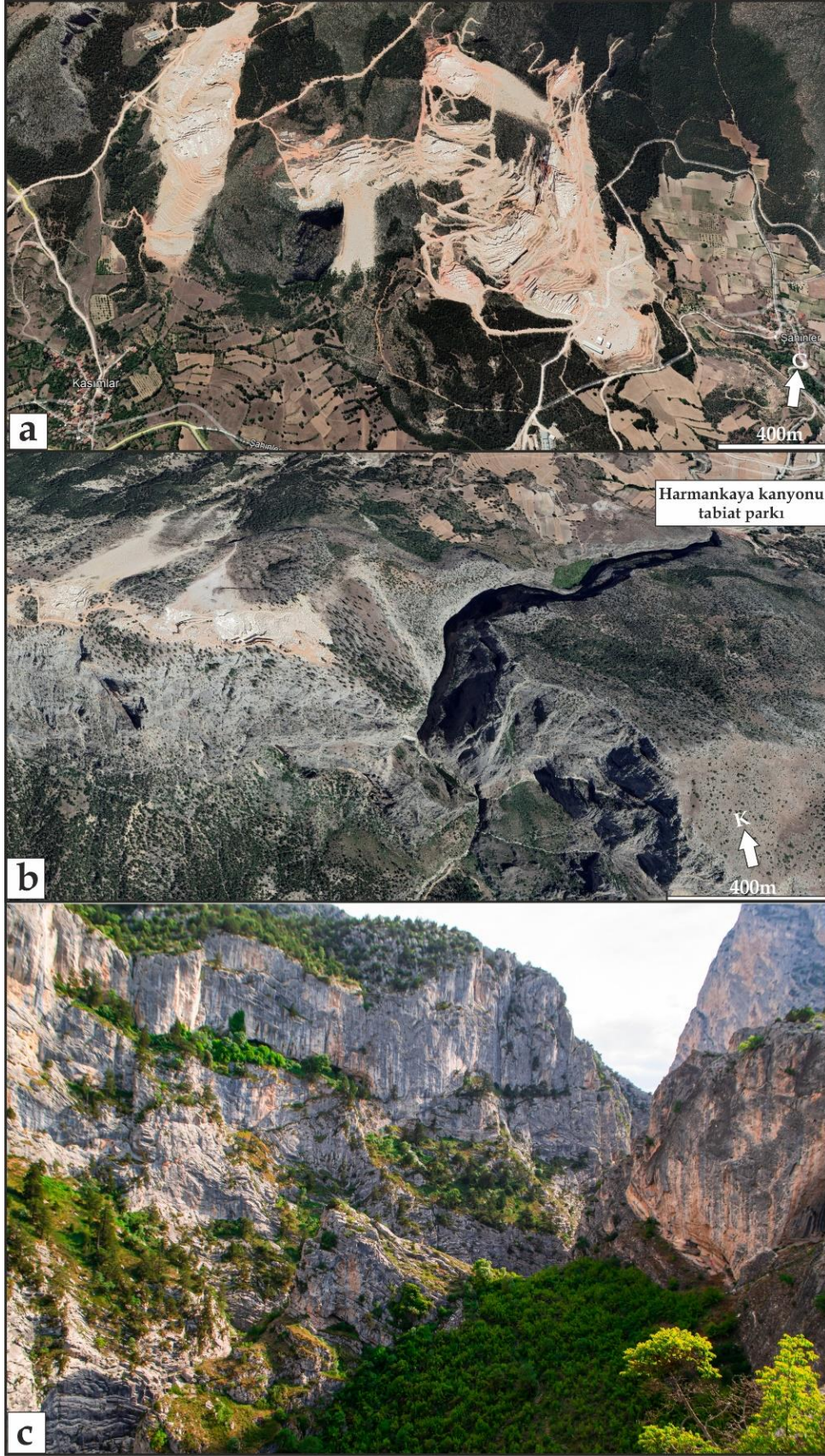
Tablo 2. Temmuz 2021 tarihli görüntüye uygulanan kontrollü sınıflandırma haritasının doğruluk analizi

	Temmuz 2015	Referans Sınıfları				Toplam (Kullanıcı)	Kullanıcı Doğruluğu (%)
		Su Kütlesi	Yeşil Alan	Arazi Örtüsü	Karbonatlı Mostra		
Tahmin Sınıfları	Su kütlesi	86	9	15	0	110	78
	Yeşil Alan	1	76	23	0	100	76
	Arazi Örtüsü	1	17	166	4	188	88
	Karbonatlı Mostra	3	0	27	74	104	71
	Toplam (Üretici)	91	102	231	78	502	
	Üretici Doğruluğu (%)	94	74	71	94		
	Genel Doğruluk (%)	80					
	Kappa Tutarlılık Katsayısı =	0.72					

Maingi vd. (2002)'de kappa değerleri; 0.40'ın altı için düşük, 0.40-0.79 aralığı için orta ve 0.79'un üstü için güçlü olarak tanımlanmıştır. Her iki harita için %80 ve üzerinde belirlenen genel doğruluk değerleri ve 0.78/0.72 değerindeki kappa katsayıları, bu haritaların değişim analizi için kullanımını uygun göstermektedir. Tarım alanlarını, bozkır bitki örtüsünü ve jeolojik birimleri kapsayan genel bir sınıf olan arazi örtüsü, tematik haritalarda yer almasına rağmen sonuç haritasında bu sınıf yerine bölgenin jeoloji haritasında (Akbaş vd., 2011) yer alan litolojilere yer verilmiştir (Şekil 6). Yeşil alan sınıfıysa, otsu bitkileri ve ormanlık alanları kapsamaktadır. Sakarya Nehri'nin güneyindeki magmatik ve metamorfik kayaların olduğu bölgelerde açılan mostralara, karbonatlı mostra sınıfında yer almasıyla çalışmadaki en büyük kısıtlamayı oluşturmuştur. Ancak bu durum, madencilik faaliyetleri sonrası gelişen yüzeylerin uzaktan algılama ortamında tanımlanması, şeklinde yürütülen çalışmanın ana hedefini büyük ölçüde etkilememektedir. Özellikle Harmankaya Kanyonu Tabiat Parkı'nın batı yamacındaki Mesozoyik kireçtaşı mostralarda artış gösteren alanlar çalışmadaki en kritik bulguyu oluşturmaktadır. Kritik görülen bu alan ve çevresinde, 502'şer noktayla piksel bazında yapılan doğruluk analizlerine ek olarak saha-gözlem çalışmaları yürütülmüştür. Söğüt-İnhisar çevresinde işletilen mermerlerin (Şekil 7a ve 7b) metamorfik kökenli olmayışı ve doğal yapısı gereği jeolojik süreksizliklerin yaygın olması (Şekil 7c) gibi nedenler işletmelerin kalıcı ve sürekli olmasını zorlaştırmakta bu da yeni işletme alanları açılmasına yol açmaktadır. 6 yıllık süreçte yaklaşık olarak 3 km² değerinde tasarimsal olarak hesaplanan madencilik sonrası gelişen mostralardaki artış değerleri yorumlandığında; Yerleşim yerlerinin azlığı, bozkır bitki örtüsünden kaynaklı yeşil alanların göreceli olarak az alan kaplayışı gibi etkenlerin Sakarya Nehri kuzeyinde ve güneyinde mermer veya maden arama-işletme faaliyetlerinin kontrolsüz yayılmasına yol açabileceği öngörüsünü oluşturmuştur.

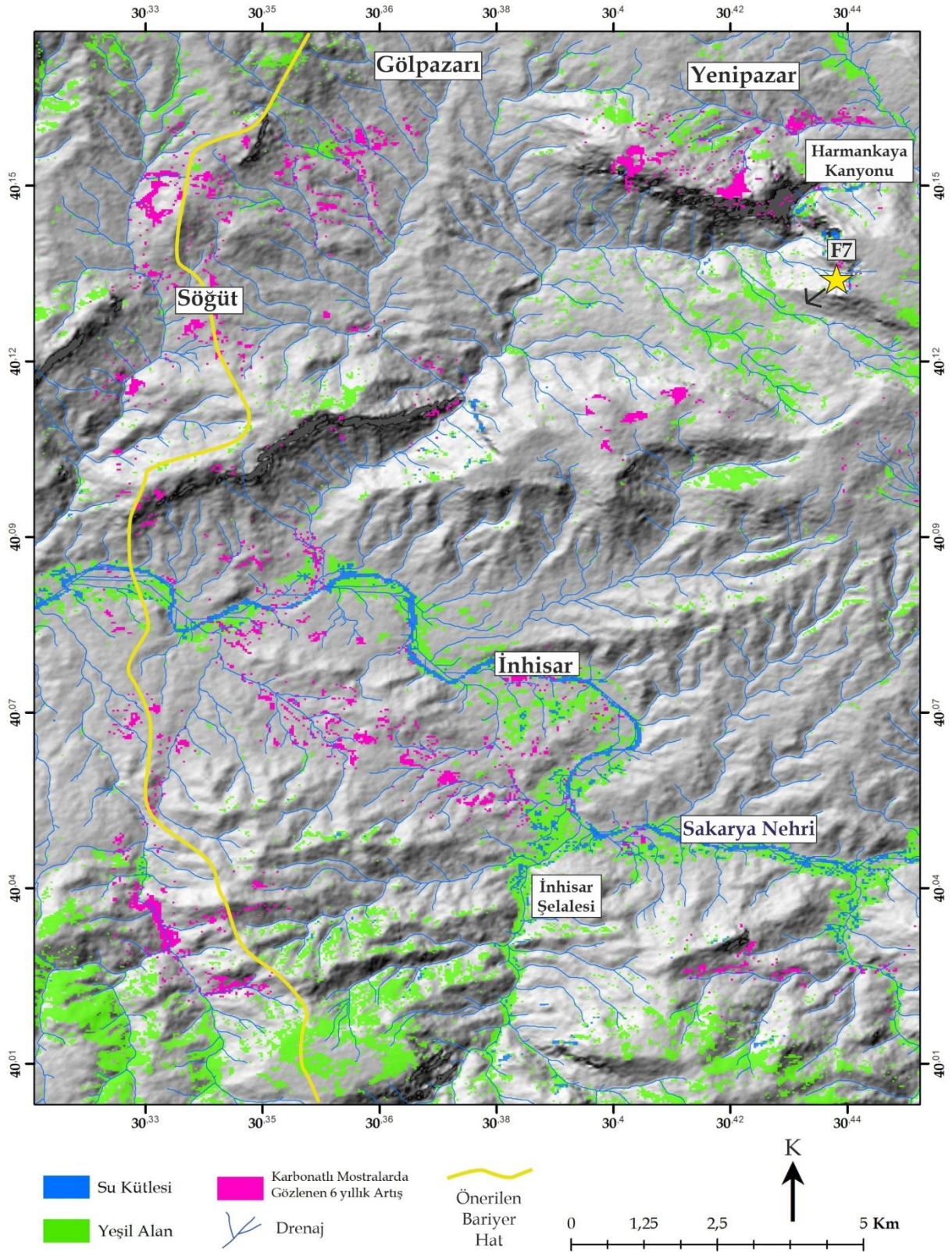


Şekil 6. Jeoloji haritası (Akbaş vd., 2011) (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü yer bilimleri portalından (<http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>) sayısallaştırılarak uyarlanmıştır) üzerinde çalışma sürecinde elde edilen uzaktan algılama tabanlı bulgular



Şekil 7. (a) Gölpazarı güneybatısında geniş yayılım sunan işletme sonucu açığı çıkmış karbonatlı kayaç mostrasının Google Earth görüntüsü (lokasyon Şekil 1: F5), (b) Harmankaya Kanyonu Tabiat Parkı'nın batısında gözlenen işletme sonucu oluşan mostraların Google Earth görüntüsü (lokasyon Şekil 1: F6), (c) İşletmelerde kullanılan kayalarda gözlenen doğal deformasyon izleri (bakış yönü: GB, lokasyon: Harmankaya Kanyonu Tabiat Parkı)

Gölpazarı-Yenipazar-İnhisar üçgeni içerisinde yer alan bölgede doğa için önem arz eden; kanyon vadiler, şelaleler, akarsular, yeşil alanlar ve en önemlisi Harmankaya Kanyonu Tabiat Parkı yer almaktadır. Bu alanların yayılmakta olan madencilik faaliyetlerinin olumsuz etkilerinden korunması adına Sakarya Nehri'ni besleyen drenaj ağları gözetilerek tasarimsal bir bariyer zon önerilmiştir (Şekil 8).



4. Sonuç ve Öneriler

Sürekli ve ücretsiz görüntü sağlayan Landsat-8 uydusunun 30m çözünürlüklü bantları kullanılarak yürütülen çalışmadaki alan, konumsal çözünürlük gözetilerek bölgesel ölçekte seçilmiştir. Sakarya Nehri, İnhisar-Söğüt hattında yaklaşık olarak 20 km boyunca devamlılık sunduğu bölgede kuzeyden ve güneyden drenaj ağlarıyla beslenmektedir. Nehrin beslendiği alanlarda İnhisar Şelalesi ve Harmankaya Kanyonu Tabiat Parkı gibi doğal çevre için önemli ve korunması gereken alanlar yer almaktadır.

Gölpazarı güneybatısında yoğun olarak gözlenen, madencilik sonrası gelişen mostraların doğuda Yenipazar'a kadar kesikli olarak yayıldığı gözlenmektedir. Bu mostralar çevre kayaçlara göre daha yüksek reflektans değerlerine sahip olmakta ve Uzaktan Algılama ortamında tanımlanabilmektedir. Çevre değişimini izlemek amacıyla aralarında 6 yıllık fark olan Temmuz 2015 ve Temmuz 2021 yıllarına ait görüntülerden tematik haritalar oluşturularak değişim analizleri yapılmıştır. Genel doğrulukları %84 ve %80 olan haritaların değişim analizleri, insan faaliyetleri sonucu gelişen mostraların 6 yılda yaklaşık olarak 3 km² arttığını göstermektedir. Bu artıştaki kaynağın, bölgede yaygınlaşan mermer arama ve işletme faaliyetlerinden ileri geldiği görülmektedir. Özellikle, Harmankaya Kanyonu Tabiat Parkı'nın batı yamacında mermer işletme faaliyetleri sonucu artış gösteren mostralar, çalışmadaki en dramatik bulguyu oluşturmuştur. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri tabanında derlenen veriler ışığında, çalışma alanı batısında yoğunluk kazanan madencilik faaliyetlerinin, bölgedeki doğal yapıların ve Sakarya Nehri'nin beslenme alanlarının korunması adına, tasarımsal olarak belirlenen bariyer hattın doğusuna geçmemesi gerektiği önerilmektedir.

Mermerler jeolojik olarak, kireçtaşının sıcaklık ve basınca bağlı metamorfizmasıyla oluşmaktadır ancak sert ve kompakt kireçtaşları da mermer olarak işletilebilmektedir. Mermer işletmeciliğinde jeokimya, dayanım gibi parametrelerin yanısıra süreksizlik düzlemleri önemli rol oynamaktadır. İşletmelerde istenmeyen bir parametre olan süreksizlik düzlemleri genel bir ifadeyle, tektonik faaliyetler sonucu oluşan kayaç ve tabaka devamlılıklarını kesen kırık düzlemleridir. Paleojeolojik süreçte Tetis Okyanusu'nun kapanma sürecinden etkilenmiş olan bölgedeki kayaçlar deformasyon izleri taşımaktadır. Bu kayaçlar üzerinde, uzaktan algılama tabanında tespit edilen, işletmelere bağlı gelişen mostralar sahada gözlemlenmektedir (Şekil 9). Doğal çevre için önemli yapıların olduğu bölgede, jeokimyasal ve tektonik şartlar mermer arama-işletme faaliyetlerinin aleyhine görünmektedir. İnşaat, dekorasyon ve süs eşyası yapımı gibi alanlarda ekonomik değeri olan mermer işletmeciliğine alternatif olabilecek, Kılıç ve Başkaya (2018)' de belirtilen ekonomik getirisi olan agro-turizm gibi çalışmaların geliştirilmesi bölgenin doğal yapısına çok daha uygun görünmektedir.



Şekil 9. Deformasyon izleri gösteren Mesozoyik tortul kayaçlar üzerinde uzaktan algılama tabanlı analizlerde tespit edilen işletmelerin arazi fotoğrafı (lokasyon Şekil 8: F7, bakış yönü: GB)

Kaynaklar

- Akar, Ö., & Güngör, O. (2012). Rastgele orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 1(2), 139-146.
- Akar, Ö., & Görmüş, E. T. (2019). Göktürk-2 ve Hyperion EO-1 uydu görüntülerinden rastgele orman sınıflandırıcısı ve destek vektör makineleri ile arazi kullanım haritalarının üretilmesi. *Geomatik*, 4(1), 68-81.
- Akbaş, B., Akdeniz, N., Aksay, A., Altun, İ. E., Balci, V., Bilginer, E., ... & Yurtsever, A. (2011). *1:1.250.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası*. Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü.
- Algancı, U. (2018). Arazi örtüsü değişimlerinin çok zamanlı Landsat 8 uydu görüntüleri ile belirlenmesi: İstanbul örneği. *Harita Dergisi*, 84(160), 24-33.
- Atak, B. K., & Tonyaloğlu, E. E. (2020). Alan kullanım/razi örtüsü ve bitki örtüsündeki değişimin arazi yüzey sıcaklığına etkisinin değerlendirilmesi: Aydın ili örneği. *Turkish Journal of Forestry*, 21(4), 489-497.
- Boehlke, J. K., & Kistler, R. W. (1986). Rb-Sr, K-Ar, and stable isotope evidence for the ages and sources of fluid components of gold-bearing quartz veins in the northern Sierra Nevada foothills metamorphic belt, California. *Economic Geology*, 81(2), 296-322.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. Boca Raton, FL: CRC press.
- Drury, S. A. (1987). *Image Interpretation in Geology*. London: Allen & Unwin.
- Galán, E. (2006). Genesis of clay minerals. In F. Bergaya, B.K.G. Theng & G. Lagaly (Eds.), *Handbook of Clay Science*, (Vol. 1, pp. 1129-1162). Oxford, UK: Elsevier Science.
- Kamel, M., Tolba, A., AbuBakr, M. M., & Omar, M. M. (2022). Utilization of Landsat-8 data for lithological mapping of neoproterozoic basement rocks in north Qena-Safaga Road, North Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 186, 104420. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2021.104420.
- Kaplan, G., & Avdan, U. (2017). Water extraction technique in mountainous areas from satellite images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 046002. doi: 10.1117/1.JRS.11.046002.
- Kaya, Ö. A., Kaplan, G. (2021). Uzaktan Algılama Yöntemleri ile Burdur Gölü'ndeki Alansal Değişiminin Belirlenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(1), 1-12.
- Kılıç, T., & Başkaya, Z. (2018). Bilecik ilinin agro-turizm potansiyeli. *International Journal of Geography and Geography Education*, 38, 234-246.
- Maingi, J. K., Marsh, S. E., Kepner, W. G., & Edmonds, C. M. (2002). *An Accuracy Assessment of 1992 Landsat-MSS Derived Land Cover for the Upper San Pedro Watershed (US/Mexico)*. Retrieved from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10076P3.PDF?Dockey=P10076P3.PDF>
- Mueller, M. A., Licht, A., Campbell, C., Ocakoğlu, F., Taylor, M. H., Burch, L., ... & Beard, K. C. (2019). Collision chronology along the İzmir-Ankara-Erzincan suture zone: Insights from the Sarıcakaya Basin, western Anatolia. *Tectonics*, 38(10), 3652-3674.
- Okay, A. I., & Tüysüz, O. (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. In B. Durand, L. Jolivet, E. Horvath & M. Seranne (Eds.), *The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen* (Vol. 156, pp. 475-515), London: Geological Society.
- Okay, A. İ. (2011). Tavşanlı Zonu: Anatolid-Torid Bloku'nun dalma-batmaya uğramış kuzey ucu. *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, 142, 195-226.
- Okay, A. I., Sunal, G., Sherlock, S., Kylander-Clark, A. R., & Özcan, E. (2020). İzmir-Ankara Suture as a Triassic to Cretaceous Plate Boundary-Data From Central Anatolia. *Tectonics*, 39(5), e2019TC005849. doi: 10.1029/2019TC005849.
- Otto, A., Dziggel, A., Kisters, A. F. M., & Meyer, F. M. (2007). The New Consort Gold Mine, Barberton greenstone belt, South Africa: orogenic gold mineralization in a condensed metamorphic profile. *Mineralium Deposita*, 42(7), 715-735.
- Pekkan, Ö. I. (2018). *NDVI değerleri değişim analizi: Karaburun yarımadası, İzmir örneği* (Yüksek Lisans Tezi), Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Radwin, M. H., & Bowen, B. B. (2021). Mapping mineralogy in evaporite basins through time using multispectral Landsat data: Examples from the Bonneville basin, Utah, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(6), 1160-1176.
- Sarıfakıoğlu, E., Özen, H., Çolakoğlu, A., & Sayak, H. (2008). İzmir-Ankara-Erzincan kenet zonundaki suprasübdüksiyon ofiyolitleri: petrolojisi, mineral kimyası ve tektonomagmatik ortamı. *Geosound*, 52, 111-156.
- Şengör, A. C., & Yılmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75(3-4), 181-241.
- Turan, T. İ. (2018). *Kaymaz (Eskişehir) ve Himmetdede (Kayseri) altın yataklarının jeolojik özelliklerinin karşılaştırılması* (Doktora Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

- Xie, X., Du, P., Xia, J., & Luo, J. (2015). Spectral indices for estimating exposed carbonate rock fraction in karst areas of southwest China. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(9), 1988-1992.
- Yılmaz, B., Demirel, M., & Balçık, F. (2022). Yanmış Alanların Sentinel-2 MSI ve Landsat-8 OLI ile Tespiti ve Analizi: Çanakkale/Gelibolu Orman Yangını. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(1), 76-86.

Remote Sensing Monitoring and Assessment of Silk Road in Turkey: Integrating Drone Systems with GPR and RM

Türkiye'de İpek Yolu Uzaktan Algılama İzleme ve Değerlendirme: Drone Sistemlerinin GPR ve RM ile Entegrasyonu

Gökhan Kılıç^{1*} 

¹Izmir University of Economics, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 35330, İzmir/Türkiye.

ORIGINAL PAPER

*Corresponding author:

Gökhan Kılıç
gokhan.kilic@ieu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1115887

Article history

Received: 12.05.2022
Accepted: 26.07.2022
Published: 18.09.2022

Abstract

Maintaining a country's heritage requires the implementation of appropriate methods, which enable the condition assessment of historic infrastructure with preferably zero damages/interventions and minimum post-inspections. A vast expanse of intricate land and sea-route networks is known as the Silk Roads. They were crucial in bringing Eastern and Western cultures together. Additionally, it has been noted that major cities in Western Anatolia, such as Baghdad or Izmir, have been able to establish links because of their advantageous position. Non-Destructive Techniques (NDT) can meet such criteria, while they are also time and cost-efficient. This paper recommends the combined use of several techniques to maximize information range and accuracy. More specifically, High Definition and Infrared Thermography (IRT) drone systems to assess sub-surface state and detect external heritage defects, and Ground Penetrating Radar (GPR) and Resistivity Measurement (RM) for detecting internal defects. By accumulating suitable data from heritage structures along the Silk Road in Turkey, this study presents a comprehensive approach that can accurately identify surficial and internal defects, in terms of their location and size.

Keywords: Non-destructive techniques, Infrared thermography, Drones, Ground penetrating radar, Resistivity measurement, Historic heritage

Özet

Bir ülkenin mirasının korunması, tercihen sıfır hasar/müdahale ve minimum son denetimlerle tarihi altyapının durum değerlendirmesine olanak sağlayan uygun yöntemlerin uygulanmasını gerektirir. Karmaşık kara ve deniz yolu ağlarının geniş bir alanı İpek Yolları olarak bilinir. Doğu ve Batı kültürlerini bir araya getirmede çok önemlidirler. Ayrıca Batı Anadolu'daki Bağdat veya İzmir gibi büyük şehirlerin avantajlı konumları nedeniyle bağlantı kurabildikleri kaydedilmiştir. Tahribatsız Teknikler (NDT) bu kriterleri karşılayabilirken aynı zamanda zaman ve maliyet açısından verimlidir. Bu makale, bilgi aralığını ve doğruluğunu en üst düzeye çıkarmak için çeşitli tekniklerin bir arada kullanılmasını önermektedir. Daha spesifik olarak, yüzey altı durumunu değerlendirmek ve dış miras kusurlarını tespit etmek için Yüksek Çözünürlüklü ve Kızılötesi Termografi (IRT) drone sistemleri ve dahili kusurları tespit etmek için Yere Nüfuz Eden El Radarı (GPR) ve Direnç Ölçümü (RM) kullanılmıştır. Bu çalışma, Türkiye'de İpek Yolu üzerinde uygun verileri toplayarak, yer ve büyüklük açısından yüzeysel ve iç kusurları doğru bir şekilde tanımlayabilen kapsamlı bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Tahribatsız teknikler, Kızılötesi termografi, Dronlar, Yer radarı, Direnç ölçümü, Tarihi miras

1. Introduction

Main ancient roads, such as the Silk Road, used basic cultural and geographical principles to connect important economic and strategic centres. The routes were carefully chosen to ensure quick, secure and easy movement, even under difficult geomorphological conditions. Ancient roads connecting major centres usually ran through valleys, alongside rivers, across mountain passes, along wide mountain ridges or open plains. Geomorphological, climatic, and environmental factors played a significant role in deciding these routes so that they remained open year-round, while minimizing threats and losses to humans. These historic roads provided safe and comfort facilities, as well as alternative routes wherever needed. In earlier periods of history, smaller scale links connected societies and cultures, but later, additional routes were developed to create vast networks, across continents, such as the Silk Road, the Persian King's Way, Hadrian's Road and the ancient American Indian paths (Dell et al., 2014).

The silk trade originated in Central Asia and the Middle East in the 2nd century and continued into the 18th century. Significant demand developed from state dignitaries and wealthy people in Europe and Asia for silk from China. Silk products were used in large quantities, especially by the Sasanids, Arabs, Byzantines, Selcuks, Ottomans and many European states (Yıldırım and Oban, 2011). The Silk Road, which developed out of economic necessity to meet this demand, is the oldest and longest road network in history. It retained its importance from the 2nd century to the 1800s, playing a crucial role in connecting East and West, and North and South (Figure 1). Its geographies encompassed three distinct ethnicities as well as different civilizations, cultures, political bodies, nations, languages and religions. For centuries, the road was the scene of inter-state disputes and wars, but despite this, it also had a role in creating a sense of unity and common understanding (Özgün, 2008; Oban, 2006).



Figure 1. Routes of the silk road (Özgün, 2008)

Izmir, on Turkey's Aegean coast, played an important role in the Silk Road as an international trade centre and important port after the 1620s. For example, the French historian Paul Masson mentions the arrival of Persian silk in Izmir in 1621. Persia was the main source of silk production and export to the Middle East during the 17th century. By the end of the Ottoman-Persian war of 1615-18, Izmir had already become a major rival of the city of Aleppo, which was then the centre for trading Persian silk with English merchants (Fodde, 2006).

Road maintenance is a critical factor in transportation networks. It is important to identify and repair both exterior and internal structural faults and damage, both of which can cause network failure and transportation disruption. Once a transportation project has been implemented, faults should be minimized throughout its life-cycle. Nowadays, various methods are used to detect such faults, each suited to specific pathology types. Major faults are usually observable from visual inspection, while in situ measurements provide information about their three-dimensional extents and severity. Internal faults, however, are less directly detectable, and may require techniques such as drilling cores from the infrastructure's interior in order to assess its integrity (Fodde, 2006).

This paper presents a new method that eliminates the need for core drilling to assess the condition of the heritage Silk Road, by integrating Ground Penetrating Radar (GPR) and high definition Camera Resistivity Measurement (RM) with an Infrared Thermography (IRT) drone system. The Non-Destructive Techniques (NDT) methods, GPR and RM, are used to detect internal layer defects such as faded cracks, buried holes and settlement problems. GPR is one of the most frequently-used NDT for routine sub-surface inspections due to its capacity to provide high-quality radar signal images from the interior of structural members.

IRT is an NDT for measuring object temperature based on the radiation in the infrared band (8-14 mm). Using thermodynamics and heat transmission, this thermographic approach is able to identify irregularities on and/or below the surface (Kilic, 2017). It is based on detecting changes in thermophysical properties and/or thermal reactions in the zones of the damaged areas, such as interior and exterior fractures, as well as air cavities, whose reaction to thermal is different from non-damaged areas. The surface emissivity of objects has a major effect on the thermographic results (Ahmadi et al., 2020). The emissivity of the target is influenced by both the construction materials and the surface texture; for instance, roughness, rusting, cracks and cavities. This in turn affects the temperature recorded by the camera. For this reason, different methods have been used according to particular applications: heritage structures (Ibarra-Castanedo et al., 2017), bridges (Janků et al., 2019), road surfaces (Khalifa et al., 2018), asphalt pavements (Han et al., 2020), etc).

2. Materials and Methods

2.1 Background of the survey area

The part of Silk Road in Turkey was chosen as the case study due to its geographical location. As a bridge between East and West, Anatolia was one of the route's most important segments. By the Middle Ages, the Silk Road extended along various routes from Central Asia through Anatolia, Thrace and Europe. Europe was also accessible through the Anatolian Aegean ports of Ephesus and Miletus, the Black Sea ports of Trabzon and Sinop, and the Mediterranean ports of Alanya and Antalya (Özgün, 2008). During the 18th century, Phocea, situated on the Aegean coast northwest of Izmir, began to challenge Bursa as an Anatolian silk trade hub. To avoid Bursa's silk taxes, both Far-Eastern and Persian merchants from both Persia and the Far East started sending their silk via Phocea, and later, Izmir (Oban, 2006).

Due to its location, and the presence of European merchant colonies and consulates in the second half of the 18th century, Izmir became an important silk market, particularly for European merchants. Izmir thus began to compete with Aleppo and Sayda (Sidon) for the silk trade with Europe. Consequently, the route to Izmir from Erzurum via Tokat became the most widely used Anatolian caravan route during the 18th century, due to the demand for both domestic and transit silk from Persia. Warehouses in Izmir, Istanbul and Bursa also purchased silk, with Bursa silk being exported to European ports by merchants of various nationalities residing in Anatolia's large commercial centres, especially Izmir (Oban, 2006).

2.2 Visual inspection

Visual inspection remains an important method to assess the status of heritage structures. It is cost-effective and produces direct data for visible faults, including cracks, moisture absorption, and delamination. However, because of its low level of detail and accuracy, a more thorough assessment requires more elaborate inspection methods. Experienced investigators performed several such systematic visual inspections for the examined case study, as reported in Section 3. Typically, visual inspection is the initial stage of a full condition assessment, followed by in-depth analysis, if deemed necessary. A complete evaluation involves the costly and time-consuming compilation of both qualitative and quantitative data from in-situ measurement, laboratory testing, and numerical modelling.

2.3 Ground-Penetrating Radar

Ground-Penetrating Radar (GPR) is a well-established and widely-used NDT for evaluating heritage structures. A transmitter antenna sends electromagnetic pulses that are reflected back to a receiver antenna. The stored records are analysed in the sequence to identify unexpected characteristics. Thus, GPR can provide data for hidden defects, material layers, settlements, etc. The GPR inspection used in this study aimed to reveal the hidden features in the Silk Road infrastructure. The survey was conducted with a USRADAR GPR over model on 30 March 2019. Like other imaging technologies, the triple bandwidth offers a superior range and resolution (Figure 2a). In preparation for the GPR examination, straight longitudinal and transverse lines were marked with temporary paint on the ground to ensure that the entire examined area was fully covered and all the necessary data were collected, as shown in Figure 2b.

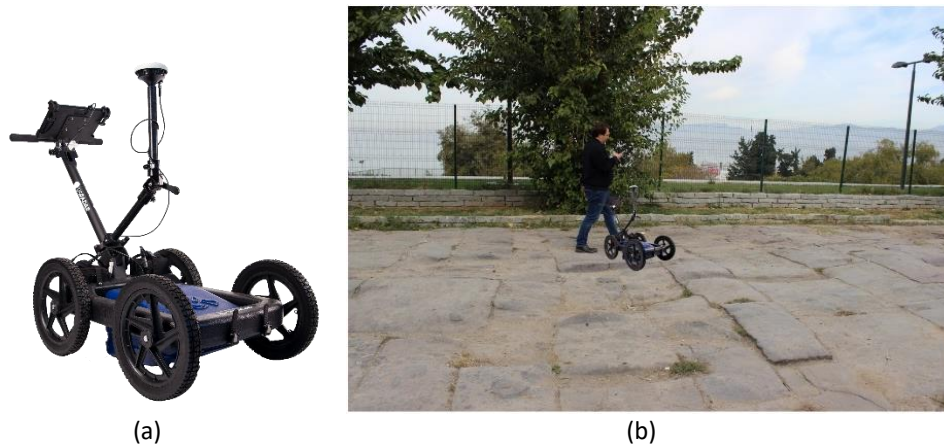


Figure 2. (a) USRADAR GPROver antenna (<https://usradar.com/>), (b) GPR survey of the silk road

The employed USRADAR GPROver tool can collect high-quality, densely-sampled data, from which high-quality tomography and 3D data can be generated. In this study, GRED data analysis software was used to generate the 2D underground layer tomography and a 3D image of the surveyed volume. A tomographic map can be created by combining the longitudinal and transversal data.

2.4 Resistivity Measurement

Resistivity was measured by a Wenner series of electrodes, most of which were mounted in small holes drilled in gaps in the Silk Road to ensure good contact. Resistivity was determined by passing an AC current through the two external electrodes and measuring the tension between the two internal electrodes (potential difference). To improve its precision, this method was repeated several times in various locations (Cavalcanti et al., 2018; Diallo et al., 2019).

The following data processing steps were applied (using Res2D-INV data processing software) to the data collected by the Multi-Electrode ERT system. Figure 3 shows the resistivity colour scale and mean resistivity (MR) values used for imaging, while Figure 4 shows the equipment used in the electrical resistivity tests to effectively assess the condition of a heritage item.

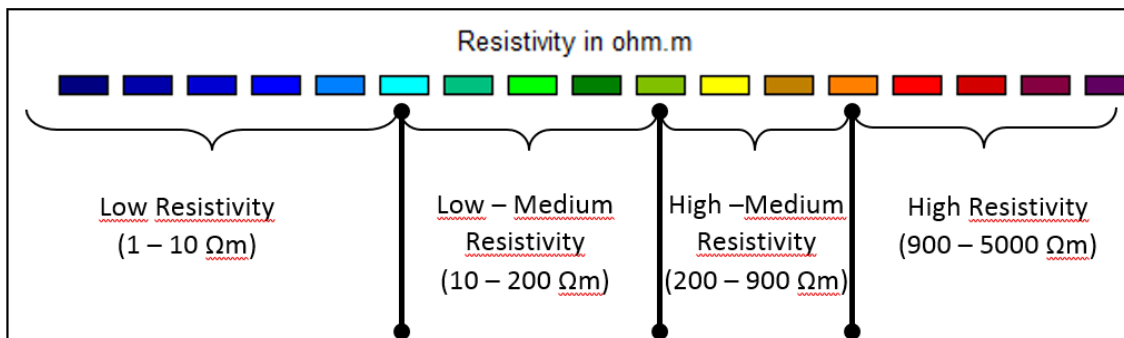


Figure 3. Resistivity colour scale and mean resistivity (Ωm) values used in imaging (Diallo et al., 2019)



Figure 4. Ambergeer brand, Mangusta TMG 255 E model multi-electrode (48 electrode capacity) resistivity tomography device

GPR and RM are rapid inspection methods based on the transmission of electromagnetic waves. The radar wave sent from the antenna passes through the medium, and is transferred when the receiving antennae detects an interface of different dielectric constants. Increasing the difference in the dielectric properties of the signal increases the probability of detecting targets, which can improve the resolution and accuracy of the method. Numerous studies have applied GPR and RM to various engineering and architectural applications (Cavalcanti et al., 2018; Diallo et al., 2019). These procedures have been effective in identifying and evaluating heritage structures, such as roads and pavements (Bai and Sinfield, 2020; Ortega-Ramírez et al., 2020; Asadi et al., 2020), bridges (Kilic and Unluturk, 2016), and tunnels (Kilic and Eren, 2018). GPR has also been applied for finding hidden targets (Kilic, 2017), moisture inspection (Shapovalov et al., 2020; Kilic, 2015), rebar corrosion assessment (Jazayeri et al., 2019), and locating sub-surface faults, such as cracks, voids, and delamination (Kilic and Eren, 2018; Johnston et al., 2018).

2.5 High-Definition Infrared Thermography Camera Drone System

A thermal imaging system measures the analysed material's absorption and emission of infrared radiation. Infrared radiation indicates variations occurring in objects due to natural heating and cooling caused by air temperature variation. The released radiation can be separated into bands, including detectable light and microwaves, with a wavelength between 0.75 and 10 microns (Fabbri and Costanzo, 2020; Meola et al., 2017). The amount of radiation depends on the sample size. Emissions are detected by a thermal imaging camera and reproduced as a colour image. In the case of corroded reinforcement bars and surrounding concrete, the delaminated area becomes more sensitive to temperature changes due to its reduced mass and increased surface area. Such differences in sensitivity allow the thermal imaging camera to determine the position of defects. Matrice 210 - Zenmuse XT2 inspection system, shown in Figure 5, is ideal for temperature extremes, as it can detect temperature differences as small as 0.08 °C. It should be noted that wind, direct sunlight, and rain can decrease the accuracy of this technique.

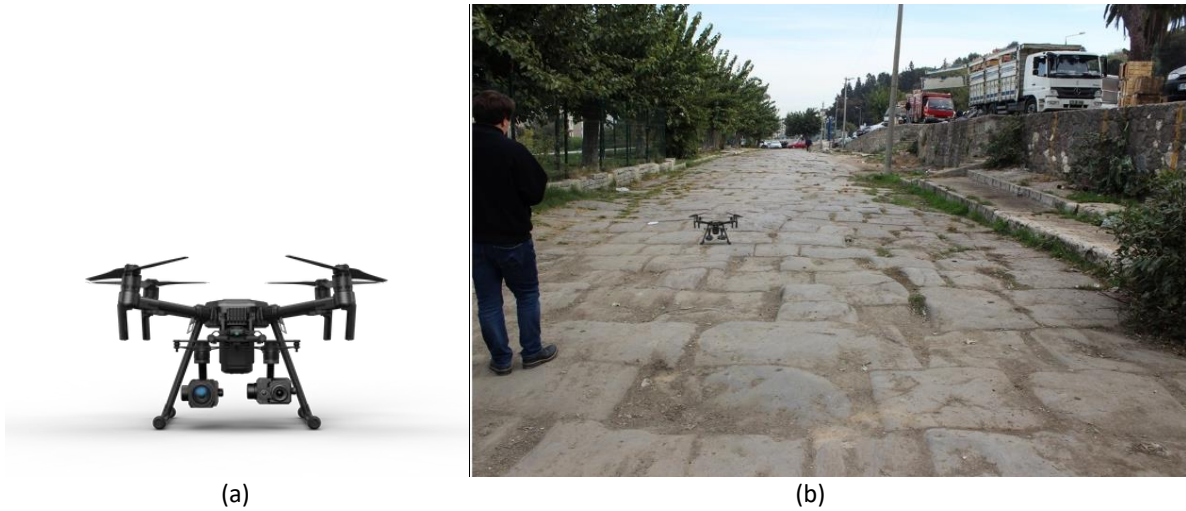


Figure 5. (a) High-definition thermal camera drone system (Dslrpros, 2021), (b) Drone survey of the silk road

3. Results

Regarding the history of a site, the design, materials, and construction technology used are as important as buildings, structures and landscapes themselves. In some historical settings, the design and development represent a utilitarian and vernacular use, while others represent a passion for a particular architecture, intricate theories relating to landscape and scenery, or the application of advances in civil engineering. The developed visual evaluation of the Silk Road consisted of external inspections, integrated with a high-definition drone camera to assess condition of the heritage. There were reports of several defects requiring extensive routine maintenance due to weather, temperature and use. Surfaces erosion and degradation is caused surface water, rain and ice. In addition, vegetation growth obscures what is often an indistinct line across the countryside. Figure 6 presents photos from the visual inspection.



Figure 6. Silk road visual inspection results

Figure 7 depicts the central cross-section of the radar signal from the Ground-Penetrating Radar (GPR) survey of the study area. The centre cross-section of the radargram shown in Figure 7 was obtained from the GPR scan in the case study road.

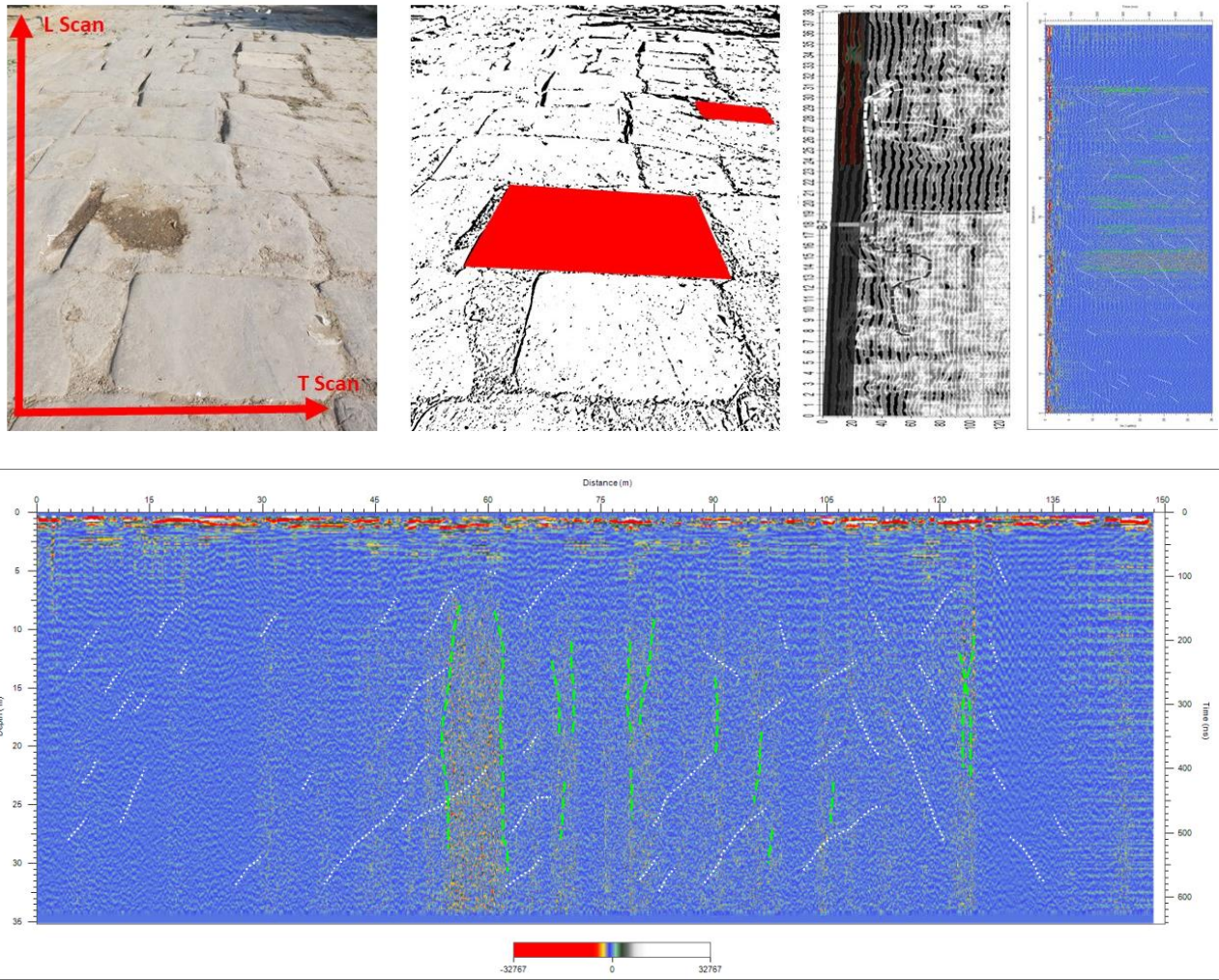


Figure 7. Processed GPR data and interpretation

Figure 8 presents the GPR radargram. Most radar echoes were recorded by the receiving antenna, causing possible interference to hidden anomaly signals. And also in Figure 8 the radargram clearly shows modifications to the historic road material.

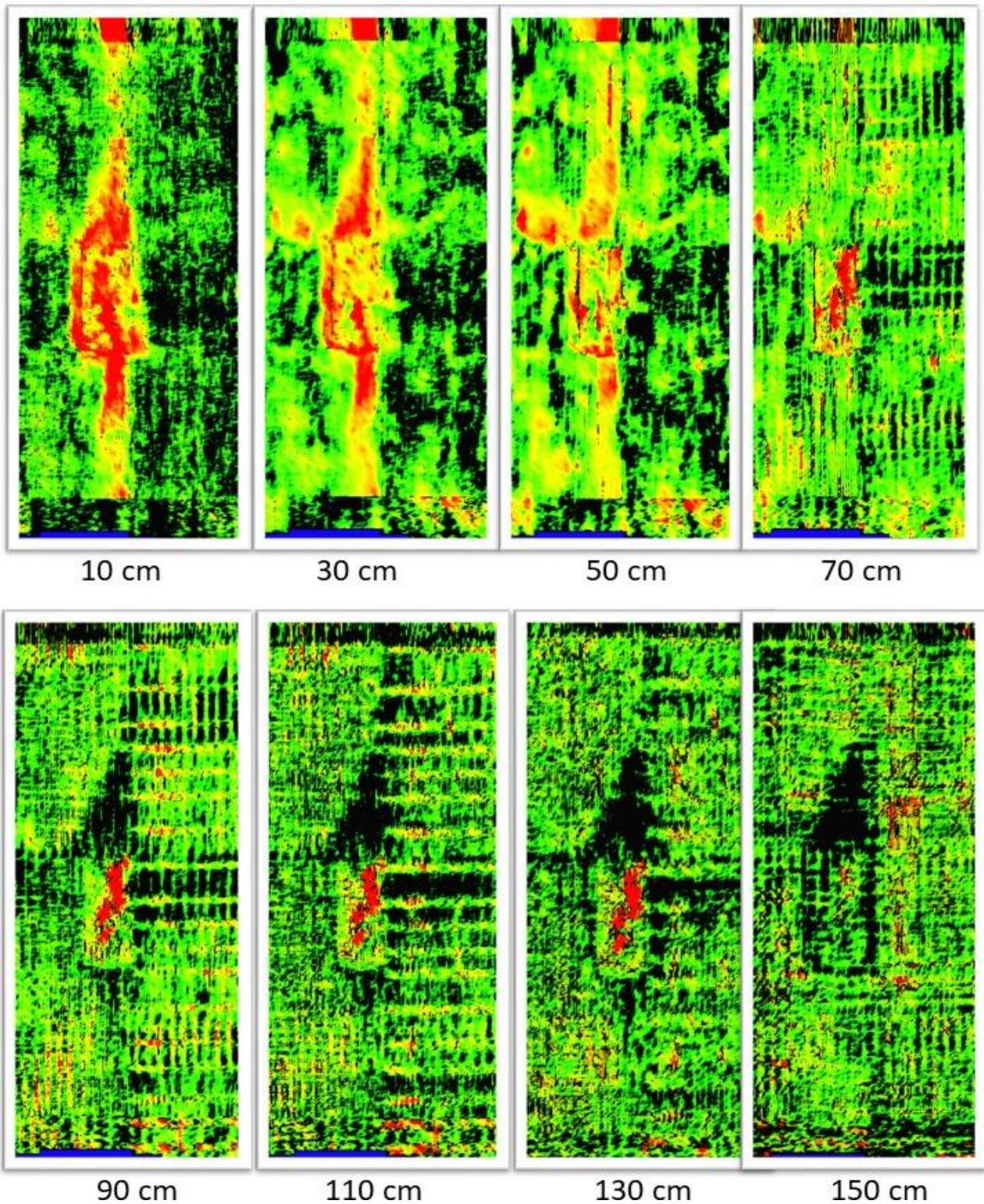


Figure 8. GPR 2D data slices, depth of each slice from left to right, and top to bottom: 10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, and 150 cm

All data recorded in the analysis were carefully examined and processed. The colour scale was measured in two sections, based on the Colour Scale used in the Resistivity Measurement (RM) views. These colours represent resistivity values, and Figure 9 illustrates the obtained resistivity measurement results.

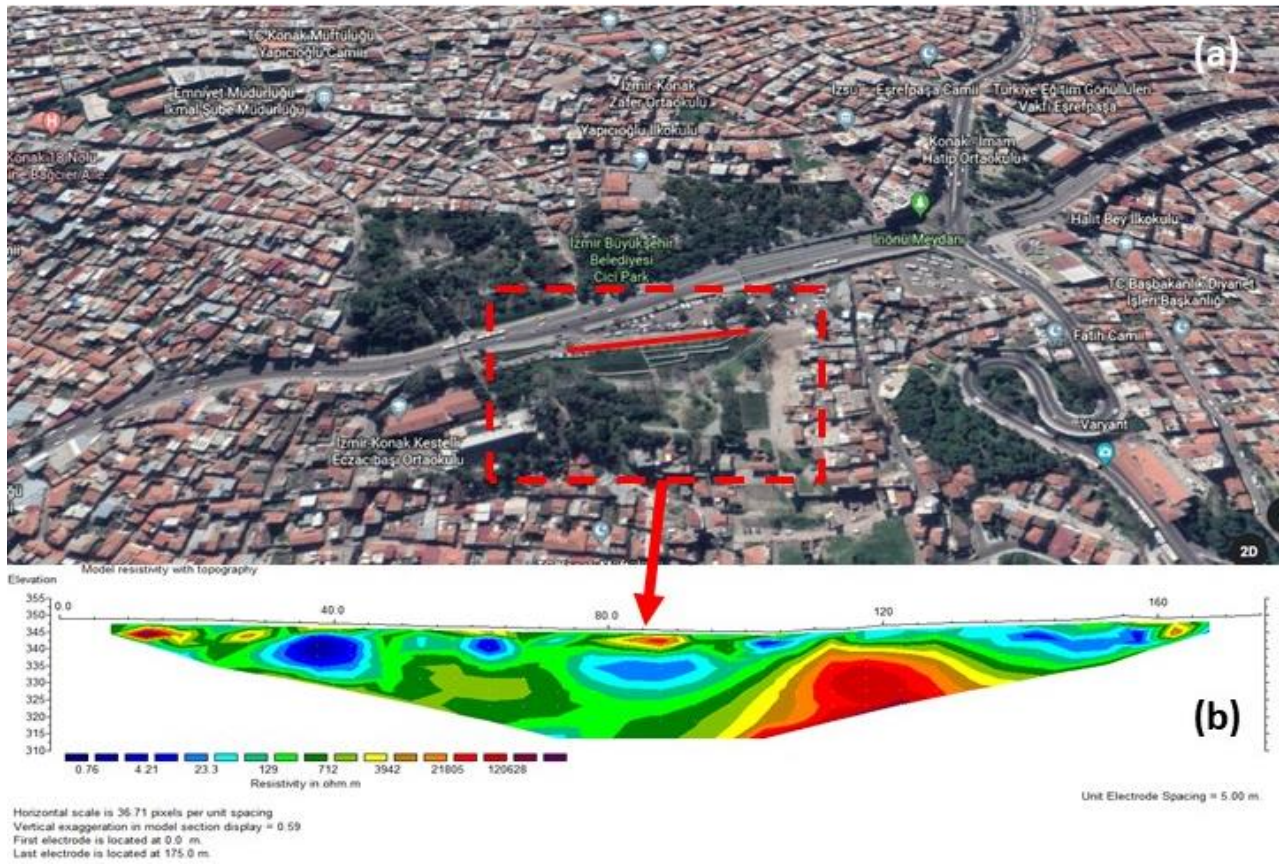


Figure 9. (a) Aerial view of Silk Road, (b) Resistivity Measurement (RM) results

These changes allow localisation of surface temperature variations. A map of internal irregularities in the material can thus be obtained by measuring surface temperatures to determine the heat flow. In this case study, this approach was used to demonstrate how IRT can provide information on the materials of a heritage item, its condition, its features, and its state of deterioration, which may not be apparent from visual inspection. The presence of stored heat (see Fig. 10) indicated that sections within the fractures in this location had become separated, necessitating rapid repair work to prevent further degradation and potentially permanent damage.

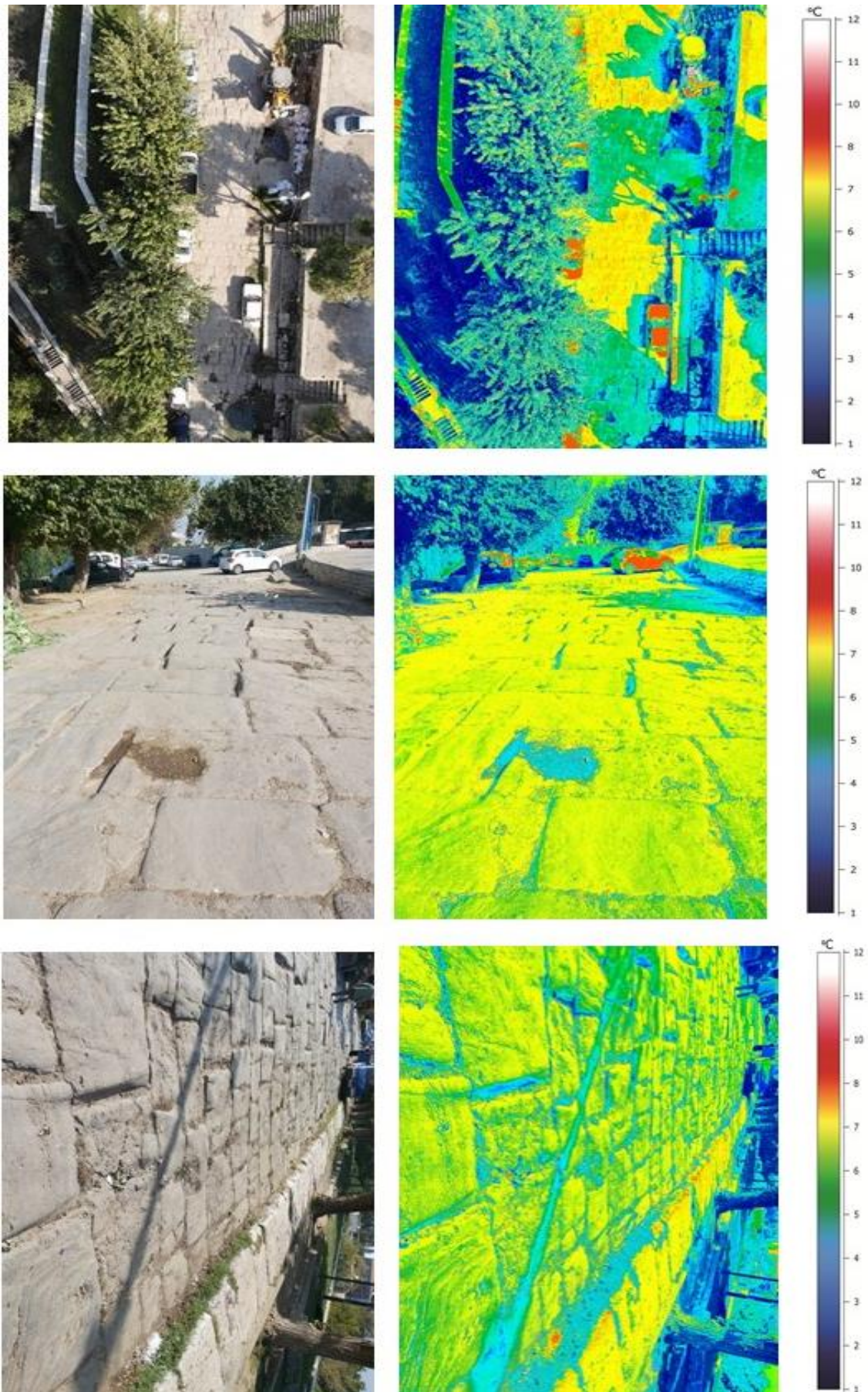


Figure 10. Thermal imaging procedure using drone system

4. Discussion

In view of the lack of existing plans or other documentation regarding the Silk Road in Turkey, a survey was conducted to evaluate its current state. This study demonstrated the urgent need for preservation work to be conducted on this important heritage. The assessment, performed by integrating measurements from three separate inspection methods: a visual survey, GPR with RM, and IRT, provided a more complete assessment of the examined heritage, which can guide decisions for determining protected zones (Capozzoli and Rizzo, 2017; Anchueta et al., 2018).

The findings demonstrate the importance of such surveys using this multidisciplinary methodology, especially for heritage items with little or no condition assessment available. While combining the broad range of employed methods created a challenge in term of complexity, the methodology adopted here demonstrates that such complexity is manageable. The outcome was the integration of NDT in a way which eliminates the need for additional examination, unless exceptionally specified (El-Qady et al., 2005; Carrière et al., 2013).

The initial visual inspection of the investigated potholes was conducted along a significant portion of the Silk Road. The combination of GPR, RM and IRT allowed the collection of detailed internal data on the exact nature and extent of the defects, and the overall condition of the examined heritage. Typically, single NDT procedures are used, but the current study clearly shows the benefits of integrating methods and the combined use of multiple techniques in maximizing data, both quantitatively and qualitatively (Sbartai et al., 2007; Pellicer and Gibson, 2011; Fernandes et al., 2015; Zeybek and Biçici, 2020; Biçici and Zeybek, 2021; Zeybek and Biçici, 2021).

5. Conclusions

The main motivation for this study of the Silk Road was the lack of surviving heritage details. This study adopted a combined approach that integrated visual inspection with three contemporary techniques: GPR, RM and IRT. The initial visual inspection revealed major faults in different parts of the road, while GPR and RM provided more information about lower layers. Intrusive testing was also conducted, and the integration of two examination techniques allowed the identification of the most severely degraded area. This approach can provide immediate feedback to allow more efficient, real-time decision-making for retrofitting and maintenance.

This study makes a significant contribution by showing how a methodology combining a variety of NDT approaches can yield accurate data on both invisible and discreet faults affecting the status of a historical infrastructure, in this case, a section of the Silk Road in Turkey. Given the lack of documentation regarding the original road, this evaluation is important in enabling the collection of high precision data, including on hidden features, which can guide a conservation program. This interdisciplinary approach provides a full analysis of the road's current condition and its future requirements. In short, this study contributes to the available information for heritage preservation professionals.

Further research could focus on the following issues:

- While much work has been carried out in direct relation to historic roads and heritage with standard geometry to track dynamic effects and other damage, no extensive study has focused specifically on condition of historic roads.
- Inspecting and recording historic roads is essential for cultural heritage conservation and protection. Therefore, it is essential to record all such roads in national historic heritage databases and to incorporate them in a national Cultural Heritage Risk Management Plan.

References

- Ahmadi, S., Burgholzer, P., Mayr, G., Jung, P., Caire, G., & Ziegler, M. (2020). Photothermal super resolution imaging: A comparison of different thermographic reconstruction techniques. *NDT & E International*, *111*, 102228. doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102228.
- Anchueta, Ó. P., Frongia, P., Di Gregorio, F., Casas Sainz, A. M., Poció Juan, A. (2018). Internal characterization of embankment dams using ground penetrating radar (GPR) and thermographic analysis: A case study of the Medau Zirimilis Dam (Sardinia, Italy). *Engineering Geology*, *237*, 129-139.
- Asadi, P., Gindy, M., Alvarez, M., & Asadi, A. (2020). A computer vision based rebar detection chain for automatic processing of concrete bridge deck GPR data. *Automation in Construction*, *112*, 103106. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103106.
- Bai, H., & Sinfield, J. V. (2020). Improved background and clutter reduction for pipe detection under pavement using Ground Penetrating Radar (GPR). *Journal of Applied Geophysics*, *172*, 103918. doi: 10.1016/j.jappgeo.2019.103918.
- Biçici, S., & Zeybek, M. (2021). An approach for the automated extraction of road surface distress from a UAV-derived point cloud. *Automation in Construction*, *122*, 103475. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103475.

- Capozzoli, L., & Rizzo, E. (2017). Combined NDT techniques in civil engineering applications: Laboratory and real test. *Construction and Building Materials*, 154, 1139-1150.
- Carrière, S. D., Chalikakis, K., Sénéchal, G., Danquigny, C., & Emblanch, C. (2013). Combining electrical resistivity tomography and ground penetrating radar to study geological structuring of karst unsaturated zone. *Journal of Applied Geophysics*, 94, 31-41.
- Cavalcanti, M. M., Rocha, M. P., Blum, M. L. B., & Borges, W. R. (2018). The forensic geophysical controlled research site of the University of Brasilia, Brazil: Results from methods GPR and electrical resistivity tomography. *Forensic science international*, 293, 101-e1. doi: 10.1016/j.forsciint.2018.09.033.
- Dell, R. M., Moseley, P. T., & Rand, D. A. J. (2014). The Evolution of Unsustainable Road Transport. In R. M. Dell, P. T. Moseley, D. A.J. Rand, (Eds.), *Towards Sustainable Road Transport* (pp. 1-64). Waltham, MA, USA: Academic Press.
- Diallo, M. C., Cheng, L. Z., Rosa, E., Gunther, C., & Chouteau, M. (2019). Integrated GPR and ERT data interpretation for bedrock identification at Cléricy, Québec, Canada. *Engineering Geology*, 248, 230-241.
- Dslrpros. (2021, October 3). Matrice 210 - Zenmuse XT2, 19850 Nordhoff Pl, Chatsworth - Z30, Retrieved from <https://www.dslrpros.com/>
- El-Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M. A., & Ushijima, K. (2005). Imaging subsurface cavities using geoelectric tomography and ground-penetrating radar. *Journal of Cave and Karst Studies*, 67(3), 174-181.
- Fabrizi, K., & Costanzo, V. (2020). Drone-assisted infrared thermography for calibration of outdoor microclimate simulation models. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101855. doi: 10.1016/j.scs.2019.101855.
- Feng, J. (2005, October). UNESCO's efforts in identifying the world heritage significance of the Silk Road. In *15th ICOMOS General Assembly and International Symposium, 2005. Proceedings*. (pp. 934-944). ICOMOS.
- Fernandes Jr, A. L., Medeiros, W. E., Bezerra, F. H., Oliveira Jr, J. G., & Cazarin, C. L. (2015). GPR investigation of karst guided by comparison with outcrop and unmanned aerial vehicle imagery. *Journal of Applied Geophysics*, 112, 268-278.
- Fodde, E. (2006). Conserving sites on the central Asian silk roads: The case of Otrar Tobe, Kazakhstan. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 8(2), 77-87.
- Han, D., Zhao, Y., Pan, Y., Liu, G., & Yang, T. (2020). Heating process monitoring and evaluation of hot in-place recycling of asphalt pavement using infrared thermal imaging. *Automation in Construction*, 111, 103055. doi: 10.1016/j.autcon.2019.103055.
- Ibarra-Castanedo, C., Sfarra, S., Klein, M., & Maldague, X. (2017). Solar loading thermography: Time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures. *Infrared Physics & Technology*, 82, 56-74.
- Janků, M., Cikrle, P., Grošek, J., Anton, O., & Stryk, J. (2019). Comparison of infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges. *Construction and Building Materials*, 225, 1098-1111.
- Jazayeri, S., Kruse, S., Hasan, I., & Yazdani, N. (2019). Reinforced concrete mapping using full-waveform inversion of GPR data. *Construction and Building Materials*, 229, 117102. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117102.
- Johnston, B., Ruffell, A., McKinley, J., & Warke, P. (2018). Detecting voids within a historical building façade: A comparative study of three high frequency GPR antenna. *Journal of Cultural Heritage*, 32, 117-123.
- Khalifa, A., Bouzouidja, R., Marchetti, M., Buès, M., Bouilloud, L., Martin, E., & Chancibaut, K. (2018). Individual contributions of anthropogenic physical processes associated to urban traffic in improving the road surface temperature forecast using TEB model. *Urban Climate*, 24, 778-795.
- Kilic, G. (2015). Using advanced NDT for historic buildings: Towards an integrated multidisciplinary health assessment strategy. *Journal of Cultural Heritage*, 16(4), 526-535.
- Kilic, G. (2017). Applications of ground-penetrating radar (GPR) to detect hidden beam positions. *Journal of Testing and Evaluation*, 45(3), 911-921.
- Kilic, G., & Eren, L. (2018). Neural network based inspection of voids and karst conduits in hydro-electric power station tunnels using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 151, 194-204.
- Kilic, G., & Unluturk, M. S. (2016). Wavelet analysis with different frequency GPR antennas for bridge health assessment. *Journal of Testing and Evaluation*, 44(1), 647-655.
- Meola, C., Boccardi, S., & maria Carlomagno, G. (2017). Nondestructive Testing With Infrared Thermography. In C. Meola, S. Boccardi, & G. maria Carlomagno (Eds.), *Infrared Thermography in the Evaluation of Aerospace Composite Materials* (pp. 85-125), Cambridge, MA, USA: Woodhead Publishing.
- Oban, R. (2006). *İzmir'in eski kentsel dokusunun korunması ve turizm açısından değerlendirilmesi* (Doktora Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Ortega-Ramírez, J., Bano, M., Cordero-Arce, M. T., Villa-Alvarado, L. A., & Fraga, C. C. (2020). Application of non-invasive geophysical methods (GPR and ERT) to locate the ancient foundations of the first cathedral of Puebla, Mexico. A case study. *Journal of Applied Geophysics*, 174, 103958. doi: 10.1016/j.jappgeo.2020.103958.

- Özgün, C. (2008). Batı Anadolu Limanlarına Ulaşan Şark Ticaret Yolu (İpek Yolu) Üzerine Gözlemler: 19. Yüzyıldan Cumhuriyetin İlk Yıllarına, Büyük Menderes Havzasında Ticaret Yolları. In A. E. Kefeli, A. Taşağıl, N. Sariahmetoğlu Karagür, Ö. D. Yılmaz (Eds.), *Dünden Bugüne İpek Yolu, Beklentiler ve Gerçekler* (pp. 227-258), İstanbul: Ötüken Yayınları.
- Pellicer, X. M., & Gibson, P. (2011). Electrical resistivity and Ground Penetrating Radar for the characterisation of the internal architecture of Quaternary sediments in the Midlands of Ireland. *Journal of Applied Geophysics*, 75(4), 638-647.
- Sbartai, Z. M., Laurens, S., Rhazi, J., Balayssac, J. P., & Arliguie, G. (2007). Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, 62(4), 361-374.
- Shapovalov, V., Yavna, V., Kochur, A., Khakiev, Z., Sulavko, S., Daniel, P., & Kruglikov, A. (2020). Application of GPR for determining electrophysical properties of structural layers and materials. *Journal of Applied Geophysics*, 172, 103913. doi: 10.1016/j.jappgeo.2019.103913.
- Vileikis, O., Quintero, M. S., Van Balen, K., Dumont, B., & Tigny, V. (2011, September). Information management systems for cultural heritage and conservation of world heritage sites. The silk roads case study. In *XXIIIrd International CIPA Symposium, 2011. Proceedings*. (pp. 364-369). ICOMOS & ISPRS Committee for Documentation of Cultural Heritage.
- Yıldırım, R., & Oban, R. (2011). The importance of heritage roads on the development of Western Anatolia and Izmir. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 19, 90-97.
- Zeybek, M., & Biçici, S. (2020). Road Distress Measurements Using UAV. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 1(1), 13-23.
- Zeybek, M., & Biçici, S. (2021). 3D Dense Reconstruction of Road Surface from UAV Images and Comparison of SfM Based Software Performance. *Turkish Journal of Remote Sensing and GIS*, 2(2), 96-105.

Orman Zararlılarının Verdiği Zararın Google Earth Engine Kullanılarak İzlenmesi

Monitoring the Damage in the Forest Caused by Forest Pests via Google Earth Engine

Şule Yaman^{1*}, Esra Tunç Görmüş¹

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Şule Yaman
suleyaman98@hotmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1116907

Yayın süreci

Geliş tarihi: 15.05.2022
Kabul tarihi: 11.08.2022
Basım tarihi: 18.09.2022

Özet

Ormanlar çeşitli nedenlerle yok olma eğilimindedir. Böcekler; üreme ve yayılma hızlarının çok yüksek olması, yayılış yönlerinin tahmin edilememesi ve böceklerle mücadelede hızlı müdahalede bulunulamaması gibi problemlere sahiptir. Bu nedenle orman kayıplarına neden olan birçok faktörün başında zararlı böcekler gelmektedir. Çalışma için kayın ağaçlarını etkileyen, kızıl kuyruklu kayın tırtılından (*Calliteara pudibunda*) etkilenmiş olan Bursa-İnegöl Tahtaköprü mevki çalışma alanı olarak belirlenmiştir. Bu çalışma, Google Earth Engine (GEE) ara yüzünde gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı için 2017-2021 dönemine ait Sentinel-2A ve Landsat-8 uydu verileri kullanılarak 6 farklı bitki indeksi; NDVI, EVI, SAVI, RVI, TVI, NPCRI hesaplanmış ve zararlılardan en çok etkilenen dönemin 2019 Ekim ayı olduğu tespit edilmiştir. 2019 Ekim ayı için ayrıca bu indeksler hesaplanmış olup makine öğrenme tabanlı sınıflandırma yöntemlerinden olan Rastgele Orman Sınıflandırma Algoritması ve Destek Vektör Makineleri yöntemleri kullanılarak, 5 farklı sınıfta (hastalıklı, sağlıklı, yol, elektrik hattı, yerleşim), dörder farklı veri kombinasyonu için sınıflandırma yapılmıştır. Sınıflandırma sonucu Landsat-8 ve Sentine-2A için karşılaştırılmış ve en iyi sonuç Sentinel-2A uydu verisi için tüm bitki indekslerinin dahil edildiği kombinasyon olup, genel doğruluk 98.48 ve kappa katsayısı 97.68 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Orman zararlıları, GEE, İzleme, Kontrollü sınıflandırma, Uzaktan algılama

Abstract

Forests tend to disappear for various reasons. Insects have problems such as very high reproduction and spread rates, unpredictable distribution directions, and inability to intervene quickly in the fight against insects. For this reason, harmful insects are at the beginning of many factors that cause forest loss. For the study, Bursa-İnegöl Tahtaköprü location, which was affected by the red-tailed beech caterpillar (*Calliteara pudibunda*) affecting beech trees, was determined as the study area. This study was carried out on the Google Earth Engine (GEE) interface. For the study area, using Sentinel-2A and Landsat-8 satellite data for the period 2017-2021, 6 different plant indexes; NDVI, EVI, SAVI, RVI, TVI, NPCRI were calculated and it was determined that the most affected period from pests was October 2019. These indices were also calculated for October 2019, and classification was made for four different data combinations in 5 different classes (diseased, healthy, road, power line, settlement) using the Random Forest Classification Algorithm and Support Vector Machines methods, which are machine learning-based classification methods. The classification result was compared for Landsat-8 and Sentine-2A, and the best result was the combination including all plant indices for Sentinel-2A satellite data, and the overall accuracy was calculated as 98.48 and the kappa coefficient as 97.68.

Keywords: Forest pest, GEE, Monitoring, Supervised classification, Remote sensing

1. Giriş

Ormanlar temiz oksijen kaynağı olup yağışları ve iklim değişikliklerini dengeler, fauna ve florayı korur, hava kirliliğini ve doğal afetleri önlemeye yardımcı olur. Ülkemizin yaklaşık %29'luk kısmını oluşturmakta olan ormanlar gün geçtikçe azalma eğilimindedir. Bunun başlıca sebeplerinden birisi zararlı böceklerdir. Böceklerin üreme hızlarının çok yüksek olması sebebiyle kısa bir sürede bütün bir ormana yayılarak verdiği zararın, yangınların verdiği zarardan çok daha fazla olduğu bilinmektedir (Eroğlu, 2017).

Sürekli olarak gelişim halinde olan uzaktan algılama yöntemlerinin, orman zararlılarının izlenmesinde ve zararlılarla mücadeledeki yeri göz ardı edilemeyecek ölçüde büyüktür. Uydu verileriyle orman alanları görüntülenerek kısa sürede orman meşcere tipleri belirlenebilmekte (Uça Avcı vd., 2014), hasar ve hastalık tespiti yapılarak orman sağlığı izlenebilmektedir (Wang vd. 2010). Spektral yansımaların spektrumun görünür ve kızıl ötesi bölgede yaptığı spektral yansımaların analizleriyle ve bitki indeksleri kullanılarak orman alanlarında sağlıklı ve sağlıklı alan tespiti yapılarak haritalar üretilmektedir. Bu haritalar yardımıyla böcek türlerinin verdiği zarar izlenerek gerekli önlemler alınabilmektedir.

Orman zararlılarını izlemek için kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden bazıları; orta ve yüksek çözünürlüklü uydu verileri kullanılarak yapılan izleme (Sunar Erbek vd., 2005; Rullan-Silva vd., 2013), GPS ile uzaktan video konumlandırma sistemi kullanılarak yapılan izleme (Wang vd., 2014), hava fotoğrafları, dronlar kullanılarak yapılan izleme (Sarıkaya vd., 2019), spektral analizler ve bitki örtüsü analizleri kullanılarak yapılan izleme yöntemleridir (Anwer ve Singh, 2019). Ancak bu yöntemlerin veri depolamada büyük yerler kaplaması, hızlı işlem ve analiz yapmakta zorlanması, veri kaynaklarına tek bir yerde hemen ulaşamaması, geniş tarih aralıklı verilerin her zaman bulunamaması gibi ortak problemleri vardır. Bu problemleri ortadan kaldırmak için bulut tabanlı hesaplama platformu olan Google Earth Engine (GEE)'nin kullanımı daha doğru bir karardır.

GEE, web tabanlı uzaktan algılama ara yüzü olup gereksiz veri depolamasının önüne geçen, veri işlem hızını bilgisayardan bağımsız tutup hızlı analiz ve karar verme yeteneğine sahip olan bulut platformudur (Dereli, 2018). Ayrıca oldukça zengin bir veri setine sahiptir. Sentinel, Landsat, MODIS gibi farklı uydulara ait geniş tarih aralıklı birçok uydu verisine ulaşmak mümkündür (You vd., 2020).

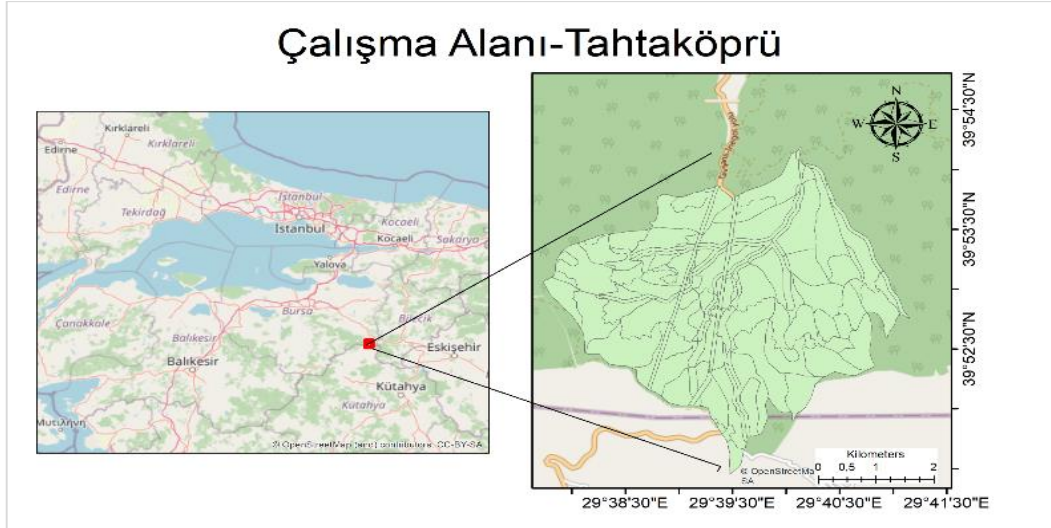
Orman zararlılarının izlenmesinde, bitki indekslerinin kullanılması, orman sağlığı izlenmesini ve zararlıların tespitini kolaylaştırmaktadır. Çalışmanın amacı, bitki indekslerini kullanarak orman zararlılarının izlenmesini GEE platformunda gerçekleştirmek ve ayrıca farklı veri kaynaklarına ait sonuçları kıyaslamaktır. Bu nedenle çalışmada, Landsat-8 ve Sentinel-2A uydu verileri kullanılmıştır. GEE'de 01/10/2017 ve 31/12/2021 dönemine ait Landsat uydusu için mevcut olan 163 adet, Sentinel-2A uydusu için 200 adet uydu görüntüsü işleme alınmıştır. İşlem sonrası zararlılardan en çok etkilenen dönemin 2019 Ekim ayına ait olduğu uydu verilerinin manuel olarak incelenmesiyle tespit edilmiştir. Yine bu döneme ait NDVI, EVI, SAVI, RVI, TVI, NPCRI bitki indeksleri hesaplanmış ayrıca sınıflandırmada da kullanılmıştır. Sınıflandırma eğitim verileri, zararlılardan en çok etkilenen dönem olan 2019 Ekim ayı üzerinden seçilmiştir. GEE'de Rastgele Orman Sınıflandırma Algoritması (RO) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) sınıflandırma yöntemleri kullanılarak her iki uydu verisi için dörder farklı veri kombinasyonu oluşturulmuş ve sınıflandırma yapılmıştır. Ayrıca genel doğruluk ve kappa katsayısı hesaplanarak Landsat-8 ve Sentinel-2A için iki farklı veri kaynağına ait sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışma, farklı veri kaynakları, farklı bitki indeksleri, farklı sınıflandırma yöntemleri gibi aşamalı, büyük depolama yerleri kaplayan ve uzun zaman alan işlemleri GEE gibi tek bir platformda kısa sürede gerçekleştirmesiyle diğer çalışmalardan ayrılmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

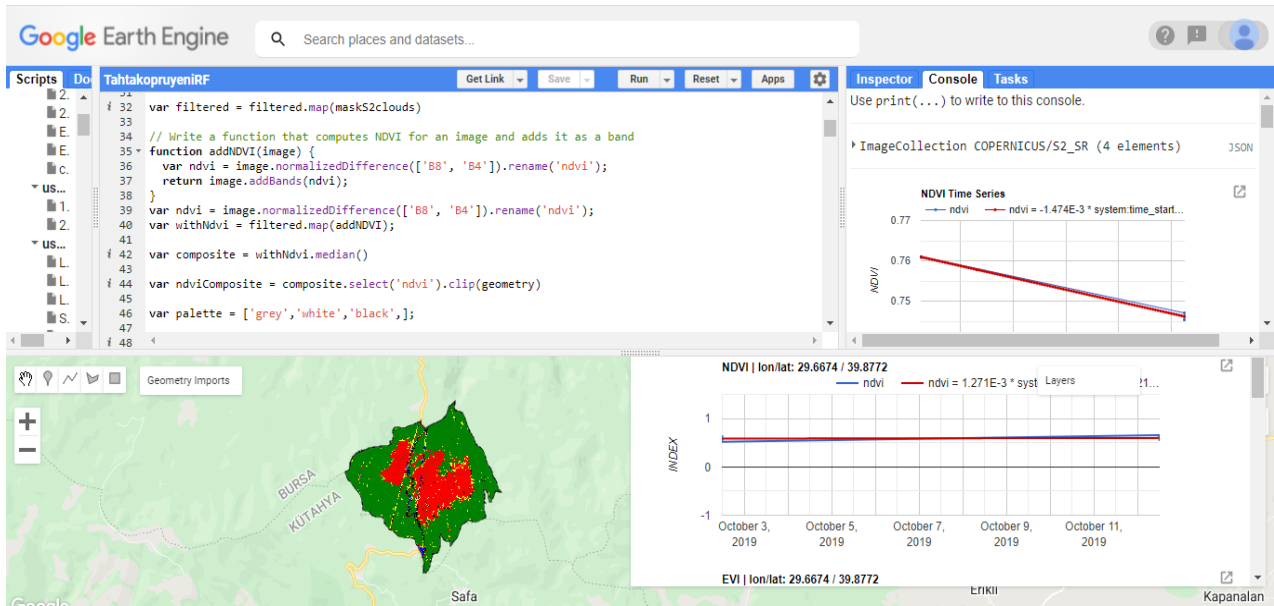
Çalışma alanı olarak Bursa-İnegöl ve Kütahya-Domaniç sınırında bulunan yaklaşık 1225 ha'lık bir alana sahip olan Tahtaköprü mevki seçilmiştir (Şekil 1). Tahtaköprü mahallesi, 39° 56' 46.82" enlem, 29° 38' 38.84" boylam coğrafi koordinatlarına sahiptir. Bölgenin başta kayın ağaçları olmak üzere çeşitli orman türlerine sahip olması çalışma alanı olarak belirlenmesinin nedenlerindedir. Ayrıca kayın ağaçlarına zarar veren orman zararlısı kızıl kuyruklu kayın tırtılı (*Calliteara pudibunda*)'nın bu bölgede önemli ölçüde zarara neden olduğu yapılan araştırmalar sonucunda tespit edilmiştir.



Şekil 1. Çalışma alanı

2.2. Google Earth Engine (GEE)

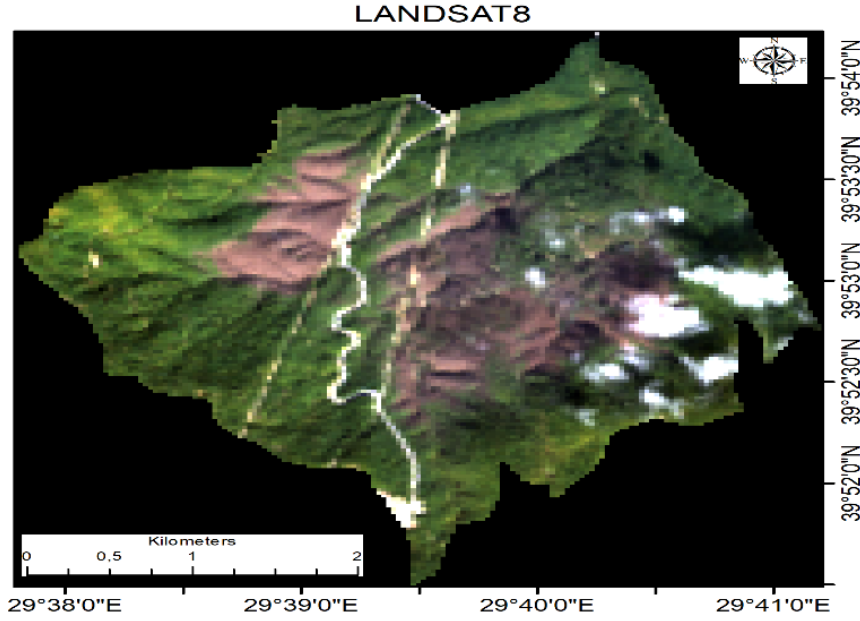
GEE, bulut tabanlı coğrafi veri işleme platformu olup bu platformda yapılan tüm analizleri kısa sürede gerçekleştirmektedir (Şekil 2). Verilerini açık kaynaklı sunarak herkese ücretsiz veri erişimi sağlamaktadır. GEE, son 40 yıla ait küresel ölçekli birçok veriye sahiptir (Aghlmand vd., 2021). Kullanıcıya hazır kod kullanma ve kod yazma imkanı sunan GEE'nin, herhangi bir ön işleme süreci gerektirmeyen verileri istenilen analizlerde kullanılabilir.



Şekil 2. Google Earth Engine arayüzü

2.3. Landsat-8

GEE'de, Landsat-8 uydu verileri yüzey yansıtımı, atmosfer üstü yansıtım ve ham görüntüler olmak üzere 3 ayrı ön işleme formatında bulunmaktadır. Çalışmada bu 3 ayrı ön işleme formatından olan "USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance" adlı atmosfer üstü yansıtım uydu verileri kullanılmıştır. Çalışma alanına ait 01/10/2017 - 31/12/2021 dönemleri içerisinde bulunan 163 adet görüntünün medyanı alınarak bulut maskesi uygulanmıştır. Şekil 3'te Landsat 8 uydusuna ait görüntü verilmiştir. Landsat-8'in sahip olduğu 30 m çözünürlüklü Band 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 ve 11 bantları kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır. Landsat-8'in sahip olduğu bant bilgisi Tablo 1'de verilmiştir.



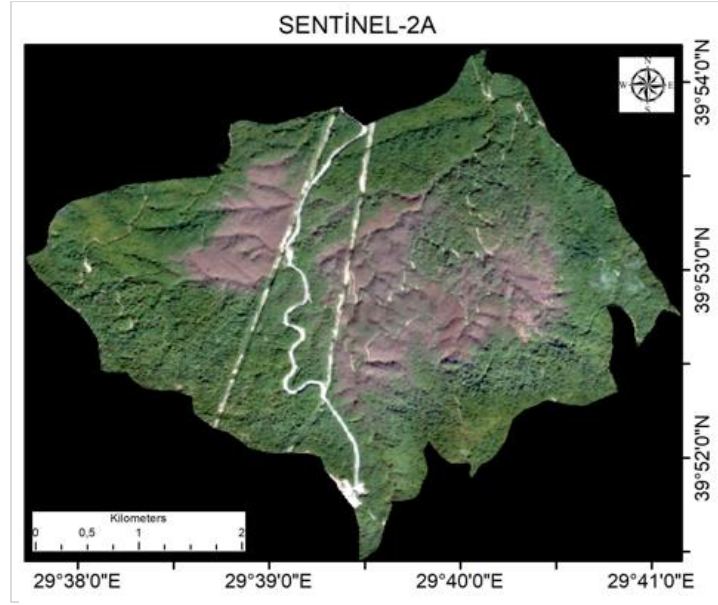
Şekil 3. Orman zararlılarından etkilenmiş alana ait Landsat 8 uydu görüntüsü (12.10.2019)

Tablo 1. Landsat 8 Collection 1 tier 1 TOA reflectance bant bilgisi

Spektral Aralık	Dalgaboyu	Çözünürlük
Band 1 - Kıyı/ Aerosol	0.433 - 0.453 μm	30 m
Band 2 - Mavi	0.450 - 0.515 μm	30 m
Band 3 - Yeşil	0.525 - 0.600 μm	30 m
Band 4 - Kırmızı	0.630 - 0.680 μm	30 m
Band 5 -Yakın Infrared	0.845 - 0.885 μm	30 m
Band 6 - Kısa Dalga Infrared	1.560 - 1.660 μm	30 m
Band 7 - Kısa Dalga Infrared	2.100 - 2.300 μm	30 m
Band 8 - Pankromatik	0.500 - 0.680 μm	15 m
Band 9 - SIRRUS	1.360 - 1.390 μm	15 m
Band 10- Termal Infrared 1	10.60 - 11.19 μm	30 m
Band 11- Termal Infrared 2	11.50 - 12.51 μm	30 m

2.4. Sentinel-2A

Sentinel uydu verileri yüksek çözünürlüğe, geniş görüş alanına ve multi spektruma sahip olması nedeniyle orman zararlılarının izlenmesinde kullanılmaktadır (Dizdaroğlu, 2019). Çalışmada, GEE’de bulunan Level-1C ve Level-2A formatlarından Level-2A formatı seçilmiştir. Şekil 4’te kırmızı kuyruklu kayın tırtılından (*Calliteara pudibunda*) etkilenmiş kayın ağaçlarına ait Sentinel-2A görüntüsü görülmektedir. 01/10/2017 - 31/12/2021 tarihleri arasında bulunan 200 görüntünün medyanı alınarak bulut maskeleyesi yapılmıştır. Sınıflandırma esnasında Sentinel-2A uydusunun 10 m çözünürlüklü Band-2,3,4 ve 8 bantları kullanılmıştır. Sentinel-2A uydusuna ait bant bilgisi Tablo-2’de verilmiştir.



Şekil 4. Orman zararlılarından etkilenmiş alana ait Sentinel-2A uydu görüntüsü (12.10.2019)

Tablo 2. Sentinel-2A bant bilgisi

Spektral Aralık	Dalgaboyu	Çözünürlük
Band 1- Kıyılar ve Aerosol (Coastal/Aerosol)	0.433 – 0.453	60
Band 2- Mavi (B)	0.458 – 0.523	10
Band 3- Yeşil (G)	0.543 – 0.578	10
Band 4- Kırmızı (R)	0.650 – 0.680	10
Band 5- Vejetasyon Red Edge	0.698 – 0.713	20
Band 6- Vejetasyon Red Edge	0.733 – 0.748	20
Band 7- Vejetasyon Red Edge	0.773 – 0.793	20
Band 8- NIR (Yakın Kızıl Ötesi)	0.785 – 0.900	10
Band 8A- Narrow NIR (Daraltılmış Yakın Kızıl Ötesi)	0.855 – 0.875	20
Band 9- Su buharı (Water vapour)	0.935 – 0.955	60
Band 10- SWIR – Cirrus (Kısa Dalga Kızıl Ötesi)	1.365 – 1.385	60
Band 11- SWIR-1 (Kısa Dalga Kızıl Ötesi-1)	1.565 – 1.655	20
Band 12- SWIR-2 (Kısa Dalga Kızıl Ötesi-2)	2.100 – 2.280	20

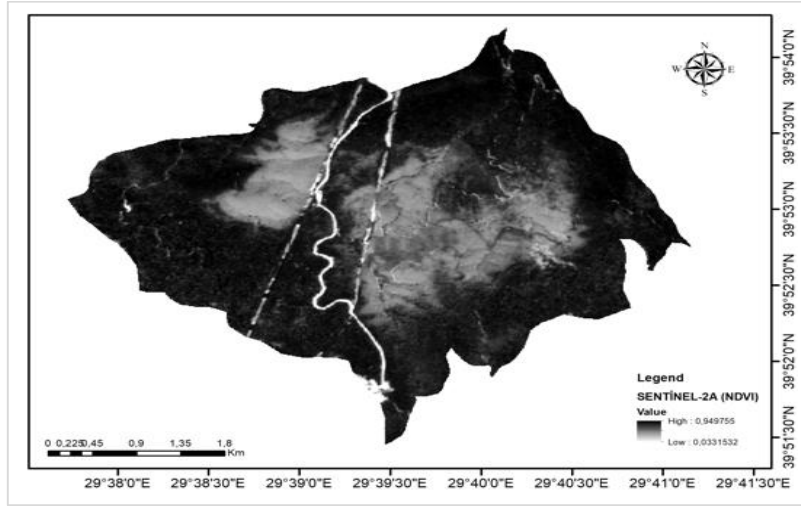
2.5. İndeksler

Çalışmada kullanılan bitki indeksleri Aghmand vd. (2021), Yılmaz ve Öztürk (2019), Cruz vd. (2020)'nin çalışmaları incelenerek orman zararlılarını izlemeye uygun olma kriterine dikkat edilerek seçilmiştir. Seçilen bitki indeksleri; NDVI (Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü Endeksi), EVI (Gelişmiş Bitki Örtüsü Endeksi), SAVI (Toprak Ayarlı Bitki İndeksi), RVI (Oran Bitki İndeksi), TVI (Dönüştürülmüş Bitki İndeksi), NPCRI (Normalize Pigment Klorofil Oranı İndeksi) indeksleridir. Landsat-8 ve Sentinel-2A için orman zararlılarından etkilenmiş olan 2019 Ekim ayına ait 4'er görüntü bulunmaktadır.

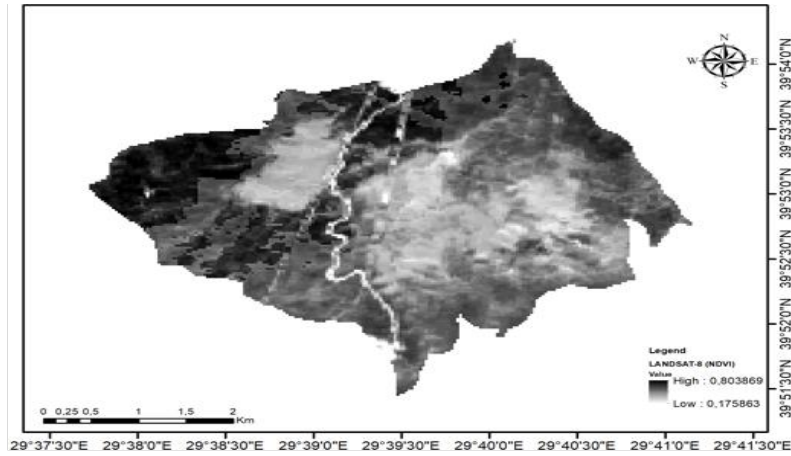
Görüntülerin medyanı alınarak bitki indeksleri hesaplanmıştır. Daha sonra bitki indeksleri de bir bant kabul edilerek sınıflandırmaya dahil edilmiştir. Bitki indekslerine ait formüller Tablo 3'te verilmiştir. Şekil 5'te Sentinel-2 uydusu kullanılarak hesaplanan NDVI sonuçları görülmektedir ve Şekil 6'da ise Landsat-8 uydusu kullanılarak hesaplanan NDVI sonuçları görülmektedir.

Tablo 3. Kullanılan bitki indeksleri ve formülleri

İndeks tanımı	İndex	Formül
Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü Endeksi (Rouse vd., 1973; Hu vd., 2016)	NDVI	$(NIR-RED) / (NIR+RED)$
Gelişmiş Bitki Örtüsü Endeksi (Justice, 1998; Matsushita vd., 2007)	EVI	$(G * ((NIR - RED) / (NIR + C1 * RED - C2 * BLUE + 1)))$
Toprak Ayarlı Bitki İndeksi (Huete, 1988)	SAVI	$((NIR-RED)/(NIR+RED+L)) * (1 + L)$
Oran Bitki İndeksi (Richardson, 1975; Major vd., 1990)	RVI	RED / NIR
Dönüştürülmüş Bitki İndeksi (Deering vd., 1975)	TVI	$\sqrt{NDVI} + 0.5$
Normalize Pigment Klorofil Oranı İndeksi (Peñuelas vd., 1994; Cruz vd., 2020)	NPCRI	$(RED-BLUE) / (RED + BLUE)$



Şekil 5. Sentinel-2A –NDVI



Şekil 6. Landsat-8 –NDVI

2.6. Sınıflandırma Yöntemi

Sınıflandırma, karar verme yöntemlerinden birisidir. Uzaktan algılama alanında kullanılan sınıflandırmanın genel amacı ise uydu görüntülerinde bulunan her bir pikseli spektral özelliklerine göre gruplandırmak ve pikselleri yansıtma değerlerine göre yeryüzünde ait olduğu gruba atamaktır (Caf, 2020).

Sınıflandırma, birçok platformda yapılabileceği gibi GEE üzerinden de yapılabilmektedir. GEE’de, Minimum Mesafe (Minimum Distance), Sınıflandırma ve Regresyon ağaçları (CART), Karar Ağacı (Decision Tree), Rastgele Orman Sınıflandırma Algoritması (RO) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) gibi makine öğrenme tabanlı sınıflandırma yöntemleri bulunmaktadır. Ancak daha yüksek doğruluklu sonuçlar vermesi nedeniyle en sık kullanılan iki sınıflandırma yöntemi RO ve DVM’dir (Akar ve Güngör, 2012; Apaydın ve Abdikan, 2021).

RO, kontrollü sınıflandırma algoritmasından olup iki aşamalı olarak çalışmaktadır. İlk aşamada, basit bir algoritma ile rastgele orman oluşturmaktadır. İkinci aşamada ise ilk aşamada oluşturulan rastgele orman üzerinden sınıflandırma yapmaktadır (Yılmaz ve Öztürk, 2019). DVM’nin ise Maksimum Olabilirlik gibi diğer geleneksel yöntemlere kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği bilinmektedir (Aghlmand vd., 2021; Mantero vd., 2005; Mountrakis vd., 2011). Benzer şekilde Kavzoğlu vd. 2010’da yaptığı çalışmada DVM yöntemlerinin en çok benzerlik yöntemine kıyasla daha yüksek doğruluklu sonuçlar ürettiği saptamıştır. DVM, daha çok sınıflandırma problemlerinde kullanılsa da regresyon problemlerinde de kullanılan kontrollü bir makine öğrenmesi algoritmasıdır. Bu algoritma, iki sınıfı birbirinden ayırmakta oldukça iyi olan hiper-düzlemi kullanarak sınıflandırma yapmaktadır (Cruz vd., 2020). Çalışmada DVM’ler için GEE’ye ait “ee.Classifier.libsvm” sınıflandırıcısı kullanılmış olup kernelType parametresi için “RBF”, gamma parametresi için “0.5” ve cost parametresi için “10” değerleri seçilmiştir.

Bu çalışmada, ilk olarak 5 farklı sınıfa ait eğitim verileri belirlenmiştir. Sınıflar, orman zararlılarından etkilenmiş olan hastalıklı alan, sağlıklı alan, yollar, elektrik hattı ve yerleşim yeridir. Her bir sınıf için sırasıyla 338, 366, 72, 57, 27 eğitim verisi seçilmiştir. Bu verilerin seçimi Landsat 8’e göre daha yüksek çözünürlüklü uydu verilerine sahip olan Sentinel-2A üzerinden yapılmıştır. Daha sonra seçilen verilerin %70’i eğitim verisi için ve %30’u ise test grubu için sınıflandırmada kullanılmıştır (Tablo 4). RO için sınıflandırmada kullanılan ağaç sayısı 10 olarak seçilmiştir.

Tablo 4. Sınıflandırma bilgileri ve nokta sayıları

No	Sınıf Adı	Eğitim Noktaları	Test Noktaları
1	Hastalıklı Alan	237	101
2	Sağlıklı Alan	256	110
3	Yollar	50	22
4	Elektrik Hattı	40	17
5	Yerleşim	19	8

3. Bulgular ve Tartışma

Sentinel-2A ve Landsat-8 uyduları hem RO hem de DVM kullanılarak ayrı ayrı sınıflandırılmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçların iyileştirilmesi amacıyla Aghlmand vd. (2021), Yılmaz ve Öztürk (2019), Cruz vd. (2020)’nin yapmış oldukları çalışmalar referans alınmış ve diğer bitki örtüsü kombinasyonları eklenmiştir. Tüm kombinasyonlara ait genel doğruluk ve kappa katsayısı hesaplanarak Tablo 5 ve Tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 5. RO ile tüm kombinasyonlar için genel doğruluk ve kappa katsayısı sonuçları

	Rastgele Orman Sınıflandırma Algoritması (RO)		
	Kombinasyon	Genel Doğruluk (%)	Kappa Katsayısı (%)
1	Sentinel-2A (S2)	90.34	85.10
2	Landsat-8 (L8)	85.70	77.39
3	S2+NDVI+SAVI+TVI+RVI+ NPCRI+EVI	90.81	85.79
4	L8+NDVI+SAVI+TVI+RVI+ NPCRI+EVI	85.58	77.33

Tablo 6. DVM ile tüm kombinasyonlar için genel doğruluk ve kappa katsayısı sonuçları

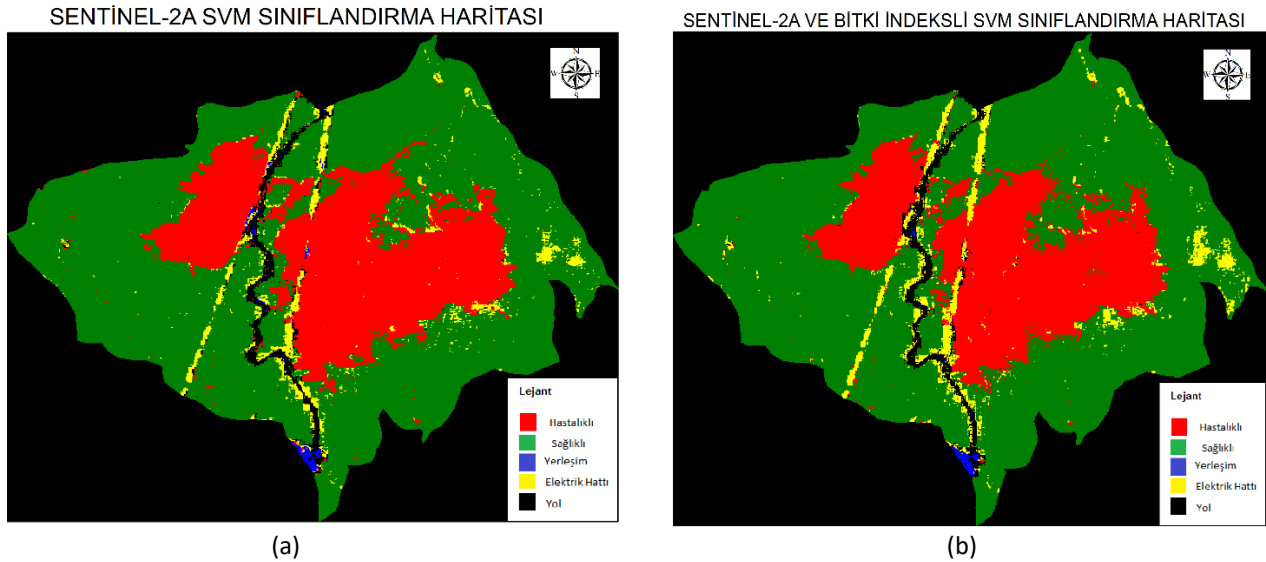
	Destek Vektör Makineleri (DVM)		
	Kombinasyon	Genel Doğruluk (%)	Kappa Katsayısı (%)
1	S2	97.78	96.60
2	L8	75.90	59.76
3	S2+NDVI+SAVI+TVI+RVI+NPCRI+EVI	98.48	97.68
4	L8+NDVI+SAVI+TVI+RVI+NPCRI+EVI	84.88	75.37

Tablo 5, incelendiğinde RO yöntemi ile yapılmış olan sınıflandırmada sadece Sentinel-2A verileri kullanıldığında genel doğruluk 90.34 ve kappa katsayısı 85.10 olarak hesaplanmaktadır. Sadece Landsat-8 uydu verileri kullanıldığında ise genel doğruluk 85.70, kappa katsayısı 77.40 olmaktadır. Tablo 6'ya göre ise sınıflandırma da DVM yöntemi kullanıldığında Sentinel-2A verileri için genel doğruluk 98.14 ve kappa katsayısı 97.13 iken Landsat-8 verileri için genel doğruluk 75.90 ve kappa katsayısı 59.76'dır.

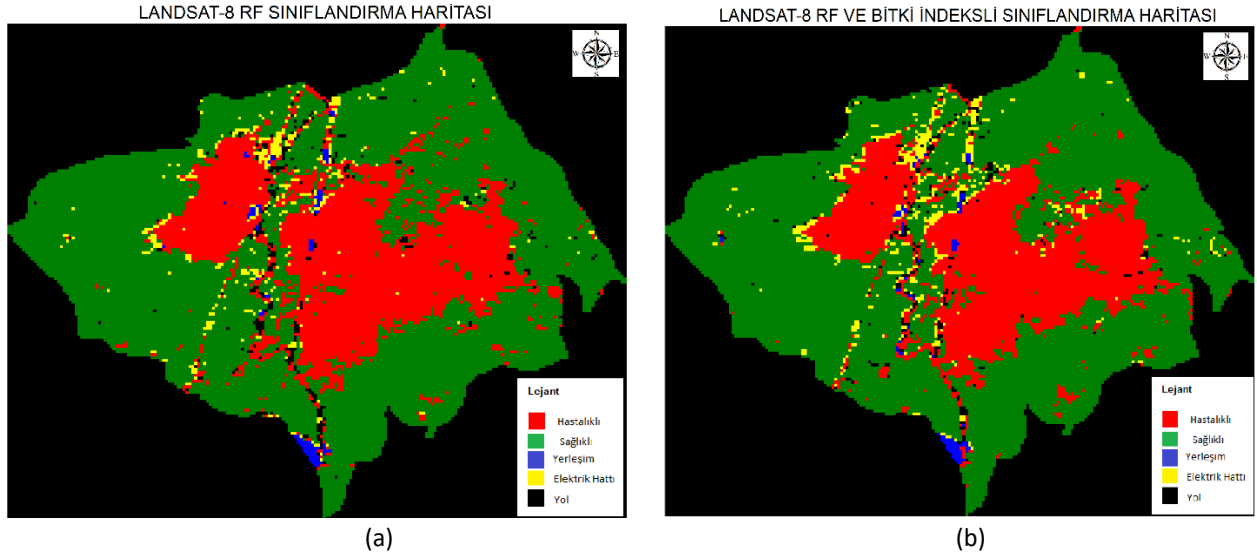
Sınıflandırmada, bitki indekslerini kullanmanın sınıflandırma kalitesini arttırdığı bilinmektedir (Dereli, 2018). Bu nedenle 6 farklı indeks (NDVI, EVI, SAVI, RVI, TVI, NPCRI) hesaplanarak sınıflandırmaya dahil edilmiştir. Eklenen bitki indekslerinden sonra tablolar incelendiğinde RO yönteminde Sentinel-2A verilerinin genel doğruluğu 90.81 ve kappa katsayısı 85.79'a yükselirken DVM yönteminde genel doğruluk ve kappa sırasıyla 98.48 ve 97.68'e yükselmektedir. Ancak Landsat-8 uydu verileri için durum biraz farklıdır. Tablo 6'ya bakıldığında DVM yöntemi için Landsat-8 verisinin genel doğruluğu 84.88, kappa katsayısının ise 75.37'ye yükseldiği görülürken Tablo 5'e bakıldığında RO yöntemi için genel doğruluğun 85.58 ve kappa katsayısının 77.33'e düştüğü görülmektedir. Bu düşüşün nedeni olarak 2019 Ekim ayı için elde edilen Landsat-8 görüntülerinin sisli oluşu gösterilebilir.

Tablolar incelendiğinde, orman zararlılarının verdiği zararın Sentinel-2A uydusu için en iyi DVM yöntemi ile (Şekil 7), Landsat-8 uydu verisi için ise en iyi RO yöntemi ile izlendiği görülmektedir (Şekil 8).

Sınıflandırma sonuçlarından sonra her bir sınıfa ait kullanıcı ve üretici doğruluk değerleri hesaplanarak bu değerlere ilişkin sonuçlar Tablo 7 ve Tablo 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Sentinel-2A (S2) uydu verisi için DVM yöntemi ile sınıflandırma (a) Sentinel-2A bitki indeksiz sınıflandırma haritası (b) Sentinel-2A bitki indeksli sınıflandırma haritası



Şekil 8. Landsat-8 (L8) uydu verisi için RO yöntemi ile sınıflandırma (a) Landsat-8 bitki indeksiz sınıflandırma haritası (b) Landsat-8 bitki indeksli sınıflandırma haritası

Tablo 7. Sentinel-2A DVM ve Sentinel-2A Bitki İndeksli DVM sınıflandırma sonuçları için her bir sınıfa ait kullanıcı ve üretici doğruluk değerleri

Sentinel-2A DVM			Sentinel-2A Bitki İndeksli DVM		
Sınıflar	Kullanıcı Doğruluğu (%)	Üretici Doğruluğu (%)	Sınıflar	Kullanıcı Doğruluğu (%)	Üretici Doğruluğu (%)
Hastalıklı	99.11	99.41	Hastalıklı	100	100
Sağlıklı	98.91	99.18	Sağlıklı	98.90	98.63
Yerleşim	90.91	97.22	Yerleşim	97.10	93.05
Elektrik Hattı	89.80	77.19	Elektrik Hattı	83.60	89.47
Yol	96.30	100	Yol	100	100

Tablo 8. Landsat-8 RO ve Landsat-8 Bitki İndeksli RO sınıflandırma sonuçları için her bir sınıfa ait kullanıcı ve üretici doğruluk değerleri

Landsat-8 RO			Landsat-8 Bitki İndeksli RO		
Sınıflar	Kullanıcı Doğruluğu (%)	Üretici Doğruluğu (%)	Sınıflar	Kullanıcı Doğruluğu (%)	Üretici Doğruluğu (%)
Hastalıklı	86.22	94.38	Hastalıklı	86.48	94.67
Sağlıklı	90.93	95.90	Sağlıklı	92.06	95.08
Yerleşim	67.44	40.27	Yerleşim	62.16	31.94
Elektrik Hattı	60.87	24.56	Elektrik Hattı	62.5	35.08
Yol	63.16	88.88	Yol	58.14	92.59

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışmanın temel amacı GEE kullanılarak orman zararlılarının izlenmesidir. Bu amaçla çalışma alanı olarak Bursa ve Kütahya sınırında bulunan Tahtaköprü mevkiine ait kayın ormanlarından oluşan bir alan seçilmiş ve bu alanda zarara neden olan kızıl kuyruklu kayın tırtılının (*Calliteara pudibunda*) izlenmesi yapılmıştır. İlk aşamada orman zararlılarının verdiği zararı izlemek için Landsat-8 ve Sentinel-2 uydularına ait 2017-2021 yılları arasındaki veriler kullanılmıştır. Bu yıllar arasında 2019 Ekim ayına ait veriler dikkat çekmiş olup RO ve DVM yöntemleri ile sınıflandırmaya tabi tutulmuştur. Ayrıca sınıflandırmaya bitki indeksleri de dahil edilerek her sınıflandırma için genel doğruluk ve kappa değeri hesaplanmıştır. GEE platformu üzerinde bu işlemler gerçekleştirildikten sonra sonuçlar karşılaştırılmış ve en iyi sınıflandırma sonucunun S2+ NDVI+ SAVI+ TVI+ RVI+ NPCRI+ EVI kombinasyonuna ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, orman zararlılarının verdiği hasar, Sentinel 2A uydusu için en iyi DVM yöntemi ile, Landsat-8 uydusu için ise en iyi RO yöntemi ile izlenmiştir.

GEE üzerinde yapılan tüm işlemler, bu işlemleri yapmak için geliştirilen programlarla kıyaslandığında işlemlerin çok daha kısa sürede gerçekleştiği görülmüştür. Aynı zamanda işlemleri gerçekleştirmek için veri sıkıntısı yaşanmamıştır. Bu durumda göstermektedir ki GEE açık kaynaklı, hızlı ve düşük maliyetli bir platformdur.

Kaynaklar

- Aghlmand, M., Kalkan, K., Onur, M. İ., Öztürk, G., & Ulutak, E. (2021). Google Earth Engine ile arazi kullanımı haritalarının üretimi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 38-47.
- Akar Ö., & Güngör, O. (2012). Rastgele orman algoritması kullanılarak çok bantlı görüntülerin sınıflandırılması. *Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi*, 106, 139-146.
- Anwer, A., & Singh, G. (2019). Geo-spatial technology for plant disease and insect pest management. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences*, 8(12), 1-12.
- Apaydın, C., & Abdikan, S. (2021). Fındık bahçelerinin Sentinel-2 verileri kullanılarak piksel tabanlı sınıflandırma yöntemleriyle belirlenmesi. *Geomatik*, 6(2), 107-114.
- Caf, D. (2020). Tarımsal Ürünlerin Uzaktan Algılama İle Tespiti. *Journal of Agriculture*, 2(2), 80-91.
- Cruz, J. A., Santos, J. A., & Blanco, A. (2020). Spatial Disaggregation of Landsat-Derived Land Surface Temperature Over a Heterogeneous Urban Landscape Using Planetscope Image Derivatives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 43, 115-122.
- Deering, D. W., Rouse, J. W., Haas, R. H., & Schell, J. A. (1975, October). Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data. In *10th International Symposium of Remote Sensing of the Environment, 1975. Proceedings*. (pp. 1169-1198). Environmental Research Institute of Michigan (ERIM).
- Dereli, M. A. (2018, Kasım). Web Tabanlı Google Earth Engine ile NDVI Zaman Serisi Analizi: Şanlıurfa il Merkezi Örneği. In *6th International GAP Engineering Conference - GAP2018. Proceedings*. (pp. 374-377). Harran Üniversitesi.
- Dizdaroğlu, T. (2019). *Sentinel-1 ve Sentinel-2 verilerinden tarımsal ürün sınıflandırması için makine öğrenme algoritmalarının karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- Eroğlu, M. (2017). Orman zararlılarının yönetimi. KTÜ Orman Fakültesi, Orman Mühendisliği Bölümü, Ders Notu. Retrieved from https://www.ktu.edu.tr/dosyalar/ormankoruma_4e649.pdf
- Hu, T., Yang, J., Li, X., & Gong, P. (2016). Mapping urban land use by using landsat images and open social data. *Remote Sensing*, 8(2), 151. doi: 10.3390/rs8020151.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., ... & Barnsley, M. J. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249.
- Kavzoğlu, T., & Çölkesen, İ. (2010). Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi. *Harita Dergisi*, 144(7), 73-82.
- Major, D. J., Baret, F., & Guyot, G. (1990). A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, 11(5), 727-740.
- Mantero, P., Moser, G., & Serpico, S. B. (2005). Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3), 559-570.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651.
- Mountrakis, G., Im, J., & Ogole, C. (2011). Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(3), 247-259.
- Peñuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J., & Field, C. B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen-and water-limited sunflower leaves. *Remote sensing of Environment*, 48(2), 135-146.
- Richardson, A. J., & Wiegand, C. L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(12), 1541-1552.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973, December). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite). In *3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 1973. Proceedings*. (pp. 309-317). NASA.
- Rullan-Silva, C. D., Olthoff, A. E., Delgado de la Mata, J. A., & Pajares-Alonso, J. A. (2013). Remote monitoring of forest insect defoliation. A review. *Forest Systems*, 22(3), 377-391.
- Sarıkaya, O., Örucü, Ö. K., Şen, İ., & Açıcı, Ö. (2019). Türkiye kayın ormanları için yeni bir tehdit kızıllı kuyruklu kayın tırtılı [*Calliteara pudibunda* (Linnaeus, 1758)]'nın günümüz ve gelecekteki potansiyel yayılış alanlarının tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 45-57.

- Sunar Erbek, F., Olmez, Z., & Uca Avci, Z. D. (2005, Ekim). Artvin yöresinde ladin (*Picea orientalis* L. Link.) orman alanlarında böcek zararlıları nedeniyle oluşan tahribatın izlenmesinde uydu görüntülerinin kullanımı. In *Ladin Sempozyumu, 2005. Proceedings.* (pp. 222-232). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi.
- Uça Avci, Z. D., Kuşak B., & Kuşak, L. (2014, Şubat). Meşcere tiplerinin uydu verileri ile belirlenmesinde farklı doku ölçütlerinin değerlendirilmesi. In *Akademik Bilişim Konferansı, 2014. Proceedings.* (pp. 121-128). İnternet Teknolojileri Derneği.
- Yılmaz, İ., & Öztürk, D. (2019). Samsun-Atakum orman alanlarının belirlenmesinde farklı bitki indekslerinin karşılaştırılması. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 3(1), 9-13.
- You, N., & Dong, J. (2020). Examining earliest identifiable timing of crops using all available Sentinel 1/2 imagery and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 161, 109-123.
- Wang, Z. B., Wang, L. L., Zhao, F. F., & Wang, C. B. (2014). A positioning system for forest diseases and pests based on GIS and PTZ camera. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 17, 012254. doi: 10.1088/1755-1315/17/1/.
- Wang, J., Sammis, T. W., Gutschick, V. P., Gebremichael, M., Dennis, S. O., & Harrison, R. E. (2010). Review of satellite remote sensing use in forest health studies. *The Open Geography Journal*, 3(1), 28-42.

Improving the Land Cover Mapping Accuracy of the Sentinel-2 Imagery on Google Earth Engine

Google Earth Engine Üzerinde Sentinel-2 Görüntülerinin Arazi Örtüsü Haritalama Doğruluğunun İyileştirilmesi

Cigdem Serifoglu Yilmaz¹ 

¹Karadeniz Technical University, Engineering Faculty, Department of Geomatics Engineering, 61080, Trabzon/Turkey.

ORIGINAL PAPER

*Corresponding author:

Cigdem Serifoglu Yilmaz
cigdem_srf@hotmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1119572

Article history

Received: 21.05.2022
Accepted: 07.08.2022
Published: 18.09.2022

Abstract

Accurate land cover information is necessary for successful monitoring, planning and management of the land cover features. Thanks to free-access satellite images, studies have focused on the creation of more accurate thematic maps, which have been used as a base data in many applications. The cloud-based Google Earth Engine (GEE) service makes it easier to access, store and process these satellite images. This study aims to improve the accuracy of a land cover map produced with the Sentinel-2 satellite image. For this purpose, as the very first step, study site was classified using only traditional bands of the Sentinel-2 data. To improve the classification accuracy, Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) data, Advanced Land Observing Satellite (ALOS) World 3D data, various spectral indices and gray-level co-occurrence matrix (GLCM) features were added to the traditional bands of the Sentinel-2 data, leading to a multi-source classification process. In this study, where the city center of Trabzon was selected as the study area, the accuracy of the land cover map produced using the Random Forest (RF) classification algorithm was increased from 83.51% to 92.78% with the auxiliary data used.

Keywords: Google Earth Engine, Land cover mapping, Image classification, Sentinel-2

Özet

Yeryüzü nesnelерinin başarılı bir şekilde izlenmesi, planlanması ve yönetimi için yüksek doğruluklu arazi örtüsü bilgisi gereklidir. Ücretsiz erişilebilen uydu görüntüleri sayesinde, birçok uygulamada temel altlık verisi olarak kullanılabilen yüksek doğruluklu tematik haritaların oluşturulmasına yönelik çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bulut tabanlı Google Earth Engine (GEE) platformu, bu tür uydu görüntülerine erişmeyi, depolamayı ve işlemeyi kolaylaştırmaktadır. Bu çalışma, Sentinel-2 uydu görüntüsü ile üretilmiş bir arazi örtüsü haritasının doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, ilk aşamada, çalışma alanı Sentinel-2 verilerinin yalnızca geleneksel bantları kullanılarak sınıflandırılmıştır. Daha sonra, sınıflandırma doğruluğunu iyileştirmek için Sentinel-2 görüntüsünün geleneksel bantlarına Sentinel-1 Yapay Açıklıklı Radar (SAR) verisi, Gelişmiş Arazi Gözlem Uydusu (ALOS) 3 boyutlu sayısal yükseklik modeli verileri, çeşitli spektral indeksler ve Gri Seviyeli Eşdizimlilik Matrisi (GLCM) özellikleri eklenerek çok kaynaklı bir sınıflandırma prosedürü geliştirilmiştir. Trabzon ilinin şehir merkezinin çalışma bölgesi olarak seçildiği bu çalışmada, Rastgele Orman (RF) sınıflandırma algoritması kullanılarak üretilen arazi örtüsü haritasının doğruluğu kullanılan yardımcı veriler ile %83.51'den %92.78'e yükseltilmiştir.

Anahtar kelimeler: Google Earth Engine, Arazi örtüsü haritalama, Görüntü sınıflandırma, Sentinel-2

1. Introduction

With the rapid development in technology, remote sensing methods have become much more important for monitoring the development of land cover and urban areas. The high-resolution information provided by the commercial satellites WorldView, Quickbird and IKONOS enables highly accurate land cover information (Pu, 2011; Akar and Güngör, 2012; Akar et al., 2017; Saralioglu and Gungor, 2020). However, the fact that these satellite images are not free has motivated researchers to use free-of-charge satellite data. The satellites of the Landsat mission (i.e., 4-TM (Thematic Mapper), 5-TM, 7-ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), and 8-OLI (Operational Land Imager)), which are in the freely-accessible satellite data category, have been generally used in previous studies for land cover mapping for half a century (Wulder et al., 2019; Nguyen et al., 2021). The Sentinel mission, which is another free-to-use satellite data, has been available since 2015.

The literature reports various studies where different image features were used together with the Sentinel-2 MSI (MultiSpectral Instrument) and Landsat TM/ETM+/OLI images to improve image classification performance (Coulter et al., 2016; Hu et al., 2021). For example, Sentinel-1 SAR data may be used with the Sentinel-2 MSI in situations where the Sentinel-2 MSI has insufficient optical capacity, such as acquiring information from dark surfaces (Hu et al., 2021). Moreover, SAR imagery has been preferred in many studies as an additional feature due to the fact that it is not affected by weather conditions, providing information about the material of the surface structures, and that it is able to penetrate through the soil or vegetation (Weng, 2012; Dong et al., 2020; Chong et al., 2021). Spectral indices that are used to extract valuable information from the imageries are another auxiliary data that can be used to improve the classification performance. The normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference water index (NDWI) and normalized difference built-up index (NDBI) are some of the commonly used spectral indices (Rawat and Kumar, 2015; Ko et al., 2015; Sonobe et al., 2017; Kobayashi et al., 2020). Thanks to their ability to separate different land cover classes and even the land features of similar spectral characteristics with respect to their reflectance at different wavelengths, spectral indices are considered almost indispensable for optical remote sensing observations and practices. The elevation information is also another data source used to increase the image classification performance. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model (DEM) (Shrestha and Saepuloh, 2019; Chen et al., 2021), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM) (Saputra and Lee, 2019; Birhanu et al., 2019), and Advanced Land Observing Satellite (ALOS) World 3D (Maffei Valero et al., 2022) are among the datasets mostly used for improving the classification performance. A significant amount of the previous studies made use of texture extraction filters like gray-level co-occurrence matrix (GLCM) (Haralick et al., 1973) Gabor filter (Xiao et al., 2010; Dumitru et al., 2016) or morphological operators (Iftikhar and Khurshid, 2011). Previous studies showed that textural information can help distinguish class types having different texture but similar spectral features (Ressel et al., 2015; Ayhan and Kwan, 2020).

In this study, the Sentinel-2 MSI data, Sentinel-1 SAR data, ALOS World 3D elevation data, green normalized difference vegetation index (GNDVI) (Gitelson and Merzlyak, 1998), modified normalized difference water index (MNDWI) (Han-Qiu, 2005), normal difference built-up index (NDBI) (Zha et al., 2003), bare soil index (BSI) (Chen et al., 2004), modified bare soil index (MBSI) (Nguyen et al., 2021) and GLCM texture features were employed in different combinations to improve the classification accuracy of the Sentinel-2 optical satellite data. All experiments were conducted in the Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017) (with JavaScript API code editor), which is a cloud-based Earth observation and analysis platform. The GEE has been resorted a lot in the recent years as it provides a huge amount of open-access geospatial and remote sensing datasets for comfortable and fast processing without any storage space problems (Tsai et al., 2018; Sun et al., 2019; Wagle et al., 2020).

2. Material and Methods

2.1 Study Area

The selected study region, which covers an area of approximately 215 km², is in the city centre of Trabzon, which is located in the northeast of Turkey. The coastal parts of the study region are generally urban areas with a dense presence of man-made structures, whereas the inner parts are rural areas. At the same time, the coastal part, which has a relatively flatter topography, turns into a rather rough mountainous terrain as moving inland. The study area is mostly covered by forests and vegetation. Figure 1 shows the study area.

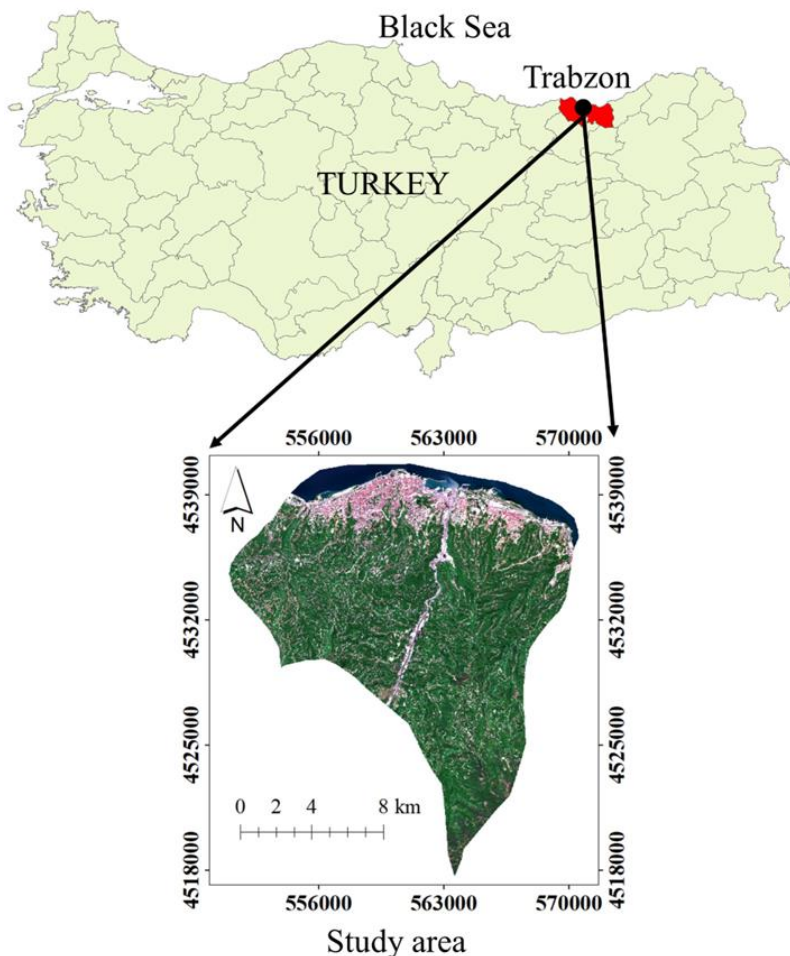


Figure 1. Study area

2.2 Data Used

This study used the Sentinel optical and SAR satellite imageries provided by the European Space Agency (ESA) Copernicus program. The pre-processed Sentinel-2 MSI data (Level 2A, Bottom-Of-Atmosphere (BOA) surface reflectance product) in the GEE collection (collection id: COPERNICUS/S2_SR) was used as the optical imagery. The Sentinel-2 MSI data includes 13 spectral bands with spatial resolutions ranging between 10 m and 60 m (10 m: B2, B3, B4, B8; 20 m: B5, B6, B7, B8A, B11, B12; 60 m: B1, B9, B10; B refers to band) (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>). The image collections were filtered with cloudy pixel percentage less than 5% to ensure working with clear image. Of the 21 images in the image collection created for May 2021, three images remained after cloud filtering. To provide balance among the pixel values of the image, median reducer function was applied and the image to be classified was generated. The SAR data was also acquired through the GEE with collection id: 'COPERNICUS/S1_GRD'. The pre-processed collection offers Sentinel-1 (C-band) Ground Range Detected (GRD) scenes with orbit file correction, GRD border noise removal, thermal noise removal, radiometric calibration, and terrain correction applied using the SRTM 30 m or ASTER DEM (<https://developers.google.com/earth-engine/guides/sentinel1>). The 10-m Sentinel-1 images were acquired in the Interferometric Wide Swath (IW) mode with two polarizations as vertical transmit/vertical receive (VV) and vertical transmit/horizontal receive (VH), with descending mode. A refined Lee filter with a pixel size of 9×9 was then used to remove the speckle noise of the SAR data (Lee et al., 2008). Plenty of attention was paid in this study to select the optical and SAR images with close acquisition dates. The SAR data was acquired on the 16th of May, 2021, whereas the optical data was generated as the median of the imageries acquired on the 12th, 15th and 20th of May 2021. The ALOS World 3D – 30 meter (AW3D30) DEM data was used to introduce the elevation and slope information to the classifier. This study used the updated version (ver 3.2) of the AW3D30, which is available in the GEE platform with collection id: 'JAXA/ALOS/AW3D30/V3_2' (Tadono et al., 2014; Takaku et al., 2014; Takaku et al., 2016; Tadono et al., 2016).

2.3 Methodology

Different scenarios were designed to improve the accuracy of the land cover maps produced with the Sentinel-2 satellite image. The first scenario considers only the traditional bands (B2, B3, B4, B8) of the Sentinel-2 image for classification. All spectral bands of the Sentinel-2 data except the B1 (coastal aerosol band) and B10 (SWIR-cirrus band) were classified in the second scenario. The spectral indices GNDVI, MNDWI, NDBI, BSI and MBSI, which were calculated through the Sentinel-2 bands, were included in the classification in the third scenario. The fourth scenario includes the elevation and slope data obtained from the AW3D30 in the classification. The fifth scenario incorporates the VV and VH polarizations of the Sentinel-1 SAR data. In the last scenario, the four GLCM metrics, namely angular second moment (asm), contrast (contrast), difference variance (dvar) and information measure of correlation 2 (imcorr2), were computed from the first principal component of the Sentinel-2 data transformed into the PCA (principal component analysis) domain. The GEE offers 14 GLCM features (Haralick et al., 1973) and four additional textural features (Conners et al., 1984). Four texture features used in this study were selected after various trials.

Table 1. The spectral indices used in this study

Indices Used	Abbreviation	Formulation
Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI	$(\text{NIR} - \text{Green}) / \text{NIR} + \text{Green}$
Modified Normalized Difference Water Index	MNDWI	$(\text{Green} - \text{SWIR1}) / \text{Green} + \text{SWIR1}$
Normal Difference Built-up Index	NDBI	$(\text{SWIR1} - \text{NIR}) / \text{SWIR1} + \text{NIR}$
Bare Soil Index	BSI	$((\text{SWIR1} + \text{Red}) - (\text{NIR} + \text{Blue})) / ((\text{SWIR1} + \text{Red}) + (\text{NIR} + \text{Blue}))$
Modified Bare Soil Index	MBSI	$((\text{SWIR1} - \text{SWIR2} - \text{NIR}) / (\text{SWIR1} + \text{SWIR2} + \text{NIR})) + 0.5$

In the first phase of the implementation, pixel samples were collected for five classes, including built-up, water, bare-soil, forest and vegetation. Table 2 presents further details on the classes. The number of the test points required to evaluate the classification result was estimated with respect to the multinomial distribution approach (Congalton and Green, 2019; Yilmaz et al., 2018; Yilmaz, 2021). This approach revealed that a minimum of 663 validation points had to be used for a reasonable accuracy assessment. To increase the robustness of the accuracy assessment, the number of the validation points used was set to a much greater value than needed. Hence, a total of 5727 pixel samples were collected for all land classes. The collected pixel samples were then divided into two groups, approximately 70% (i.e., 3996 pixels) of them for training and 30% (i.e., 1731 pixels) of them for validation. The validation data included 438, 83, 272, 556 and 382 pixels for the built-up, water, bare-soil, forest and vegetation classes, respectively. Since the water class had a homogeneous colour content, relatively smaller number of pixels were collected for this class. Afterwards, a non-parametric machine learning algorithm, the random forest (RF), was used to classify the images produced within each scenario. The RF was preferred due to its flexibility, robust performance and easy-to-tune hyper-parameters (Rodriguez-Galiano, 2012; Akar and Güngör, 2012). (1) Number of trees (ntree - "numberOfTrees"), (2) number of variables to split the nodes of trees (mtry - "variablesPerSplit"), (3) minimum leaf population ("minLeafPopulation"), (4) fraction of input to bag per tree ("bagFraction"), (5) maximum number of leaf nodes ("maxNodes"), and (6) random seed variable ("seed") are six input parameters required to tune the algorithm. Since the ntree and mtry are the most critical parameters of the RF (Amani et al., 2017), extreme care was taken while specifying their values. As a result of the trials, setting the ntree parameter to 60 and the mtry parameter to the number of input features (bands) in each scenario was found to have led to the best RF performance. The remaining four parameters were set to their default input values (<https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-classifier-smilerandomforest>).

Table 2. Description for the land cover classes considered in the study

Land Classes	Class Description
Built-up	All settlements, industrial areas, roads, coastal structures including harbor, pier, breakwater
Water	All water bodies including sea, river
Bare-soil	Soil or sand that is not cover by grass or other plants
Forest	Mixed tree varieties
Vegetation	All cultivated and uncultivated plants

The accuracy of the classified images was evaluated through the validation data consisting of 1731 pixel samples. The accuracy of each land cover map produced within each scenario was evaluated through the confusion matrix derived based on the comparison of the classification outputs with the ground truth samples (Congalton, 1991; Tassi et al., 2021). The confusion matrices produced include the producer’s accuracy (PA), user’s accuracy (UA) and overall accuracy (OA) (Congalton and Green, 2019) metrics. The PA indicates the probability of a reference pixel being correctly classified, whereas the UA indicates the probability that a classified pixel is actually from that class on the ground. The OA, as its name implies, shows the general classification accuracy and is computed by dividing the total number of correctly classified pixels to the total number of reference pixels (Congalton, 1991; Liu et al., 2007).

3. Results and Discussion

This section investigates to what extent each scenario affected the OA, PA and UA. Figures 2 and 3 present the land cover maps produced for all scenarios. The accuracy of the land cover maps produced within all scenarios were investigated quantitatively.

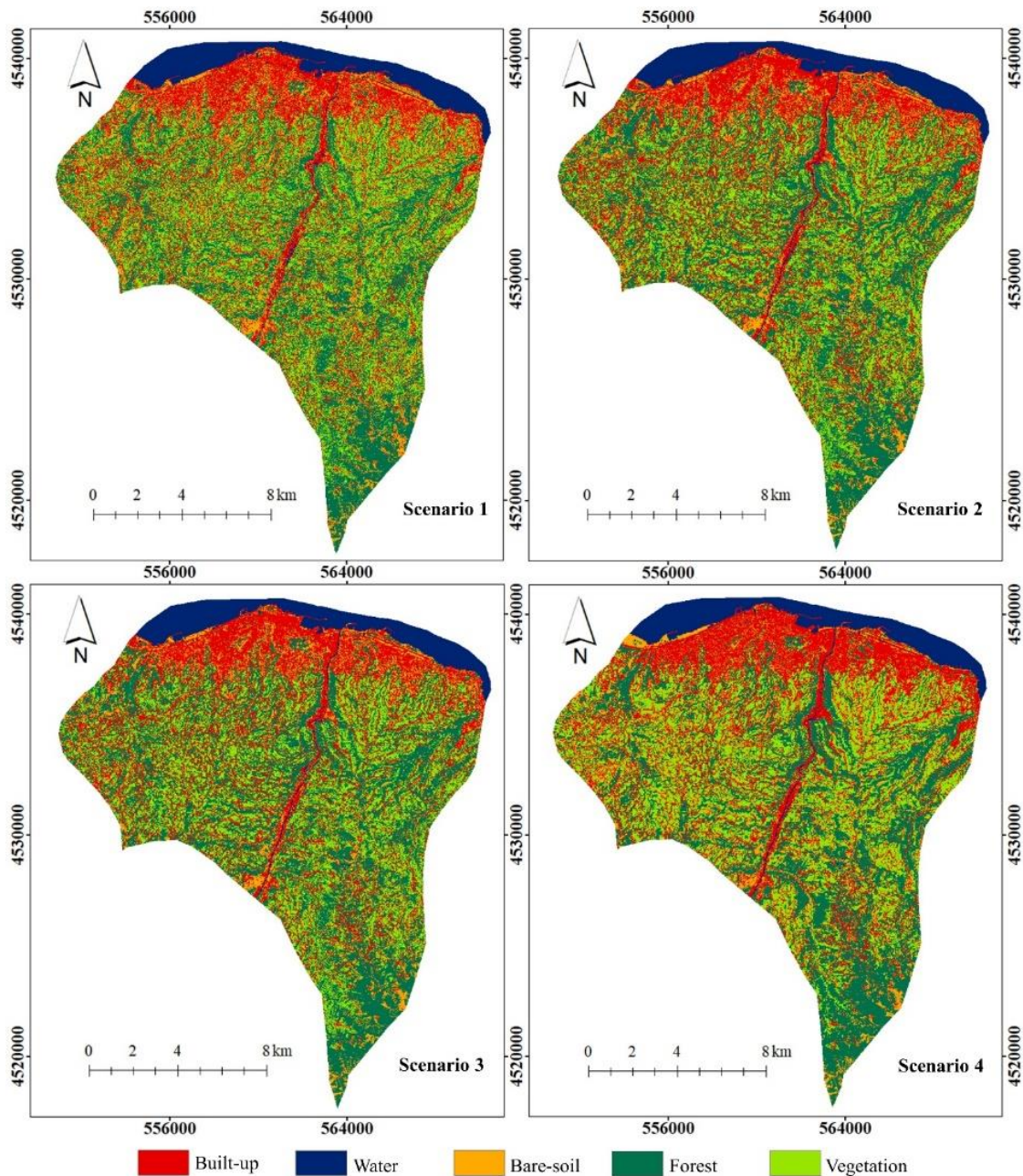


Figure 2. Land cover maps produced for the scenarios 1, 2, 3 and 4

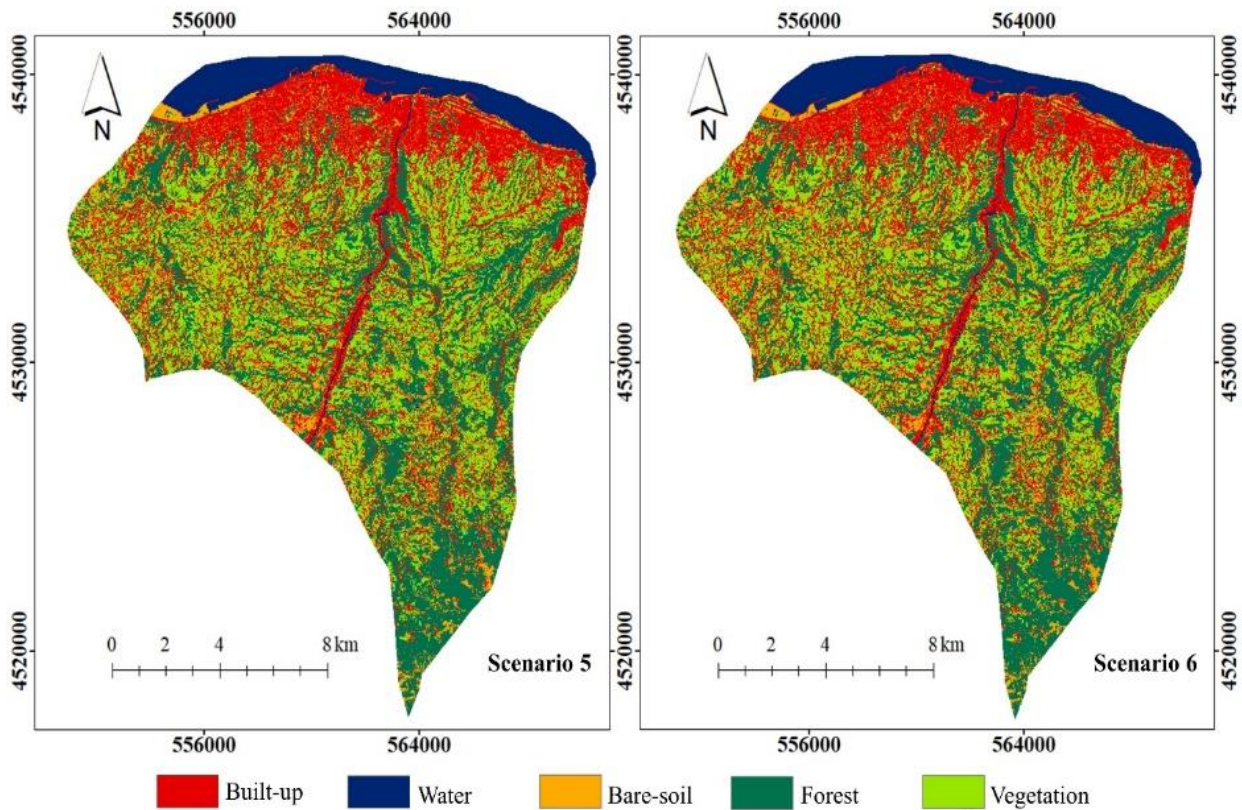


Figure 3. Land cover maps produced for the scenarios 5 and 6

The PA, UA, F-1 score (Ustuner and Balik Sanli, 2019; Tonbul et al., 2022) and OA values derived from the classified maps are given in Table 3. As seen in the table, in the first scenario, the traditional bands of the Sentinel-2 data resulted in the best PA and UA for the water class, which shows that the reference water pixels are classified with a high accuracy and that the classes other than water were generally not misclassified as water. The lowest PA (73.37%) and UA (76.19%) for this scenario were obtained for the vegetation and bare-soil classes, respectively. The lowest and highest F-1 scores were obtained by the vegetation and water classes in this scenario, respectively. The OA achieved for this scenario was found to be 83.51%. Table 3 shows that, in the second scenario, the greatest PA was achieved for the water class and the greatest UA was obtained for the vegetation class. The lowest PA and UA were obtained for the bare-soil class in this scenario. The lowest and highest F-1 scores were obtained by the bare-soil and forest classes in this scenario, respectively. The OA for this scenario was calculated as 85.70%.

As can be seen, using 11 bands of the Sentinel-2 data slightly increased the OA. In the third scenario, the greatest PA and UA were achieved for the water and forest classes, correspondingly. On the other hand, the bare-soil class was found to be the one that was found with the lowest accuracy, which was also the case in the second scenario. The bare-soil and forest classes received the lowest and highest F-1 scores in this scenario, correspondingly. The OA of the third scenario was computed as 86.27%. This reveals the fact that adding the spectral indices to the dataset of the second scenario led to a slight increase in the OA. It can also be concluded that, in this scenario, adding the spectral indices into the classification procedure resulted in a considerable increase in the classification accuracy of the forest and vegetation classes. As seen in Table 3, the highest PA was achieved for the water class in the fourth scenario. The table also shows that the lowest UA was obtained for the bare-soil class. The bare-soil and water classes led to the lowest and highest F-1 scores in this scenario, correspondingly. This scenario has an interesting point. As seen in the table, 82.72% of the reference bare-soil pixels were correctly classified, which can be considered a relatively good classification accuracy. However, 66.77% of the pixels classified as bare-soil were actually bare-soil pixels. In other words, a user who has an intention to use this land cover map on the field will notice that 33.23% of the pixels were misclassified with respect to the current condition of the field. Table 3 also depicts that, in the fifth scenario, the greatest PA and UA were achieved for the water and forest class, respectively. On the other hand, the lowest PA and UA were obtained for the built-up and bare-soil classes, respectively. The lowest and highest F-1 scores were obtained by the bare-soil and water classes in this scenario, respectively. The OA achieved for this scenario was calculated as 89.02%. As can be seen, including the VV and VH polarizations of the Sentinel-1 SAR data into the classification made a considerable contribution to the OA.

In the sixth scenario, the class that was best separated from the others was the forest class as a PA and UA of 97.84% and 98.73% were achieved for this class as a result of the classification. The lowest PA and UA were obtained for the bare-soil class. The bare-soil and forest classes led to the lowest and highest F-1 scores in this scenario, correspondingly. The OA of the sixth scenario was found to be 92.78%. As can be seen, adding the Sentinel-2 bands B5, B6, B7, B8A, B9, B11 and B12; spectral indices; topographic features; SAR information and GLCM features to the traditional Sentinel-2 MSI bands led to an 11.10% increase in the OA.

Table 3. PA, UA, F-1 score and OA metric values computed for all scenarios

Scenario		Class	PA (%)	UA (%)	F-1 score (%)	OA (%)
1	<ul style="list-style-type: none"> • Sentinel-2 MSI (B2, B3, B4, B8) 	Built-up	84.02	91.77	87.72	83.51
		Water	92.77	90.59	91.67	
		Bare-soil	82.35	76.19	79.15	
		Forest	89.20	81.95	85.42	
		Vegetation	73.37	81.21	77.09	
2	<ul style="list-style-type: none"> • Sentinel-2 MSI (all bands except B1 and B10) 	Built-up	85.16	86.95	86.05	85.70
		Water	97.59	79.41	87.57	
		Bare-soil	73.90	78.52	76.14	
		Forest	92.74	87.33	89.95	
		Vegetation	81.72	88.42	84.94	
3	<ul style="list-style-type: none"> • Sentinel-2 MSI (all bands except B1 and B10) • GNDVI, MNDWI, NDBI, BSI, MBSI 	Built-up	85.39	87.38	86.37	86.27
		Water	97.59	81.82	89.01	
		Bare-soil	73.90	78.21	75.99	
		Forest	92.39	88.62	90.47	
		Vegetation	84.60	88.04	86.29	
4	<ul style="list-style-type: none"> • Sentinel-2 MSI (all bands except B1 and B10) • GNDVI, MNDWI, NDBI, BSI, MBSI • AW3D30 - DEM and slope 	Built-up	77.17	89.89	83.05	88.28
		Water	97.59	97.59	97.59	
		Bare-soil	82.72	66.77	73.89	
		Forest	96.81	95.12	95.96	
		Vegetation	90.34	93.80	92.04	
5	<ul style="list-style-type: none"> • Sentinel-2 MSI (all bands except B1 and B10) • GNDVI, MNDWI, NDBI, BSI, MBSI • AW3D30 - DEM and slope • Sentinel-1 SAR - VV and VH 	Built-up	78.99	90.34	84.28	89.02
		Water	97.59	96.43	97.01	
		Bare-soil	83.82	68.06	75.12	
		Forest	96.76	96.59	96.67	
		Vegetation	91.10	93.55	92.31	
6	<ul style="list-style-type: none"> • Sentinel-2 MSI (all bands except B1 and B10) • GNDVI, MNDWI, NDBI, BSI, MBSI • AW3D30 - DEM and slope • Sentinel-1 SAR - VV and VH • GLCM features 	Built-up	90.18	90.39	90.28	92.78
		Water	97.59	96.43	97.01	
		Bare-soil	82.35	80.00	81.16	
		Forest	97.84	98.73	98.28	
		Vegetation	94.76	95.51	95.13	

The water class was successfully separated from the other classes in all scenarios, which is not surprising as the spectral features of the pixels of this class were much different than the pixels of the other classes. The forest and vegetation classes have spectrally similar features, which, of course, makes it more challenging to separate them, especially with a spatial resolution of 10 m. As can be seen in Table 3, including the DEM and slope information; VV and VH polarizations of the Sentinel-1 SAR data; and GLCM features into the classification procedure, played a significant role in the discrimination of these classes. The GLCM features were also found to have made a considerable contribution to the OA as they increased the OA achieved in the fifth scenario by 4.22%.

4. Conclusion

This study aimed to increase the RF classification performance of the Sentinel-2 data with the aid of auxiliary data such as spectral indices, topographical features, SAR information and GLCM texture features. These features were used to form different scenarios in the GEE platform and to what degree each scenario affected the OA was investigated. All of the auxiliary data used was found to increase the overall classification accuracy to a certain degree. However, the greatest OA increase was achieved as a result of the inclusion of the GLCM features into the classification procedure.

Although the SAR data was expected to make a good contribution to the classification accuracy, the experiments revealed the opposite. Despite the Lee filtering, SAR data still included a certain amount of noise, which is why it did not make a considerable contribution to the classification accuracy. It was also concluded that the ntree and mtry parameters of the RF classifier had a significant effect on the classification performance. The GEE makes it easier to observe and manage large-extent areas, which is a huge advantage compared to traditional techniques. On the other hand, the GEE includes hundreds of easy-to-use built-in functions in both Python and JavaScript environments, which makes it efficient for analysts. It offers widely-used satellite imageries such as MODIS, Landsat, Sentinel etc., together with their achieve imageries. Its rich data content and easy-to-use data analysis capabilities make the GEE one of the best cloud computing platforms for remote sensing applications.

References

- Akar, A., Gökalp, E., Akar, Ö., & Yılmaz, V. (2017). Improving classification accuracy of spectrally similar land covers in the rangeland and plateau areas with a combination of WorldView-2 and UAV images. *Geocarto International*, 32(9), 990-1003.
- Akar, Ö., & Güngör, O. (2012). Classification of multispectral images using Random Forest algorithm. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 1(2), 105-112.
- Amani, M., Salehi, B., Mahdavi, S., Granger, J. E., Brisco, B., & Hanson, A. (2017). Wetland classification using multi-source and multi-temporal optical remote sensing data in Newfoundland and Labrador, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 43(4), 360-373.
- Ayhan, B., & Kwan, C. (2020). Tree, shrub, and grass classification using only RGB images. *Remote Sensing*, 12(8), 1333. doi: 10.3390/rs12081333.
- Birhanu, L., Hailu, B. T., Bekele, T., & Demissew, S. (2019). Land use/land cover change along elevation and slope gradient in highlands of Ethiopia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 16, 100260. doi: 10.1016/j.rsase.2019.100260.
- Chen, D., Shevade, V., Baer, A., He, J., Hoffman-Hall, A., Ying, Q., ... & Loboda, T. V. (2021). A disease control-oriented land cover land use map for Myanmar. *Data*, 6(6), 63-78.
- Chen, W., Liu, L., Zhang, C., Wang, J., Wang, J., & Pan, Y. (2004, September). Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multitemporal TM images. In *IGARSS 2004 - 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Vol. 5, pp. 3379-3382). IEEE.
- Chong, L. U. O., Liu, H. J., Lu, L. P., Liu, Z. R., Kong, F. C., & Zhang, X. L. (2021). Monthly composites from Sentinel-1 and Sentinel-2 images for regional major crop mapping with Google Earth Engine. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(7), 1944-1957.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*, 37(1), 35-46.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. Boca Raton, FL: CRC press.
- Connors, R. W., Trivedi, M. M., & Harlow, C. A. (1984). Segmentation of a high-resolution urban scene using texture operators. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 25(3), 273-310.
- Coulter, L. L., Stow, D. A., Tsai, Y. H., Ibanez, N., Shih, H. C., Kerr, A., ... & Mensah, F. (2016). Classification and assessment of land cover and land use change in southern Ghana using dense stacks of Landsat 7 ETM+ imagery. *Remote Sensing of Environment*, 184, 396-409.
- Dong, D., Wang, C., Yan, J., He, Q., Zeng, J., & Wei, Z. (2020). Combing Sentinel-1 and Sentinel-2 image time series for invasive *Spartina alterniflora* mapping on Google Earth Engine: a case study in Zhangjiang Estuary. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(4), 044504. doi: 10.1117/1.JRS.14.044504.
- Dumitru, C. O., Schwarz, G., Cui, S., & Datcu, M. (2016, May). Improved image classification by proper patch size selection: TerraSAR-X vs. sentinel-1A. In *2016 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2016. Proceedings*. (pp. 1-4). IEEE.
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*, 22(5), 689-692.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Han-Qiu, X. U. (2005). A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 9(5), 589-595.
- Haralick, R. M., Shanmugam, K., & Dinstein, I. H. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(6), 610-621.

- Hu, B., Xu, Y., Huang, X., Cheng, Q., Ding, Q., Bai, L., & Li, Y. (2021). Improving Urban Land Cover Classification with Combined Use of Sentinel-2 and Sentinel-1 Imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(8), 533-549.
- Iftikhar, H., & Khurshid, K. (2011, November). Fusion of gabor filter and morphological operators for the detection of settlement zones in google earth satellite images. In *2011 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA). Proceedings.* (pp. 232-237). IEEE.
- Ko, B. C., Kim, H. H., & Nam, J. Y. (2015). Classification of potential water bodies using Landsat 8 OLI and a combination of two boosted random forest classifiers. *Sensors*, 15(6), 13763-13777.
- Kobayashi, N., Tani, H., Wang, X., & Sonobe, R. (2020). Crop classification using spectral indices derived from Sentinel-2A imagery. *Journal of Information and Telecommunication*, 4(1), 67-90.
- Lee, J. S., Wen, J. H., Ainsworth, T. L., Chen, K. S., & Chen, A. J. (2008). Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 202-213.
- Liu, C., Frazier, P., & Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 606-616.
- Maffei Valero, M. A., Araújo, W. F., Melo, V. F., Augusti, M. L., & Fernandes Filho, E. I. (2022). Land-use and land-cover mapping using a combination of radar and optical sensors in Roraima–Brazil. *Engenharia Agrícola*, 42(2), e20210142. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n2e20210142/2022.
- Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L. Z. (2021). A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in southeast Asia using Landsat 8. *Land*, 10(3), 231-248.
- Pu, R., Landry, S., & Yu, Q. (2011). Object-based urban detailed land cover classification with high spatial resolution IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 32(12), 3285-3308.
- Rawat, J. S., & Kumar, M. (2015). Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 77-84.
- Ressel, R., Frost, A., & Lehner, S. (2015). A neural network-based classification for sea ice types on X-band SAR images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(7), 3672-3680.
- Rodriguez-Galiano, V. F., Chica-Olmo, M., Abarca-Hernandez, F., Atkinson, P. M., & Jeganathan, C. (2012). Random Forest classification of Mediterranean land cover using multi-seasonal imagery and multi-seasonal texture. *Remote Sensing of Environment*, 121, 93-107.
- Saputra, M. H., & Lee, H. S. (2019). Prediction of land use and land cover changes for north sumatra, Indonesia, using an artificial-neural-network-based cellular automaton. *Sustainability*, 11(11), 3024-3040.
- Saralioglu, E., & Gungor, O. (2020). Semantic segmentation of land cover from high resolution multispectral satellite images by spectral-spatial convolutional neural network. *Geocarto International*, 37(2), 657-677.
- Shrestha, D. P., Saepuloh, A., & van der Meer, F. (2019). Land cover classification in the tropics, solving the problem of cloud covered areas using topographic parameters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 77, 84-93.
- Sonobe, R., Yamaya, Y., Tani, H., Wang, X., Kobayashi, N., & Mochizuki, K. I. (2017). Mapping crop cover using multi-temporal Landsat 8 OLI imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(15), 4348-4361.
- Sun, Z., Xu, R., Du, W., Wang, L., & Lu, D. (2019). High-resolution urban land mapping in China from sentinel 1A/2 imagery based on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 11(7), 752. doi: 10.3390/rs11070752.
- Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. (2014). Precise global DEM generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(4), 71-76.
- Tadono, T., Nagai, H., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. (2016). Generation of the 30 M-mesh global digital surface model by ALOS PRISM. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XLI-B4(41), 157-162.
- Takaku, J., Tadono, T., & Tsutsui, K. (2014). Generation of High Resolution Global DSM from Alos Prism. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XL(4), 243-248.
- Takaku, J., Tadono, T., Tsutsui, K., & Ichikawa, M. (2016). Validation of 'AW3D' Global DSM Generated from Alos Prism. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, III(4), 25-31.
- Tassi, A., Gigante, D., Modica, G., Di Martino, L., & Vizzari, M. (2021). Pixel-vs. Object-based landsat 8 data classification in google earth engine using random forest: The case study of maiella national park. *Remote Sensing*, 13(12), 2299.
- Tonbul, H., Colkesen, I., & Kavzoglu, T. (2022). Pixel-and Object-Based ensemble learning for forest burn severity using USGS FIREMON and Mediterranean condition dNBRs in Aegean ecosystem (Turkey). *Advances in Space Research*, 69(10), 3609-3632.
- Tsai, Y. H., Stow, D., Chen, H. L., Lewison, R., An, L., & Shi, L. (2018). Mapping vegetation and land use types in Fanjingshan National Nature Reserve using google earth engine. *Remote Sensing*, 10(6), 927-941.
- Ustuner, M., & Balik Sanli, F. (2019). Polarimetric target decompositions and light gradient boosting machine for crop classification: A comparative evaluation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 97-112.

- Wagle, N., Acharya, T. D., Kolluru, V., Huang, H., & Lee, D. H. (2020). Multi-temporal land cover change mapping using google earth engine and ensemble learning methods. *Applied Sciences*, 10(22), 8083-8103.
- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34-49.
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., ... & Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127-147.
- Xiao, P., Feng, X., An, R., & Zhao, S. (2010). Segmentation of multispectral high-resolution satellite imagery using log Gabor filters. *International Journal of Remote Sensing*, 31(6), 1427-1439.
- Yilmaz, V. (2021). Investigation of the performances of advanced image classification-based ground filtering approaches for digital terrain model generation. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(13), e6219. doi: 10.1002/cpe.6219.
- Yilmaz, V., Konakoglu, B., Serifoglu, C., Gungor, O., & Gökalp, E. (2018). Image classification-based ground filtering of point clouds extracted from UAV-based aerial photos. *Geocarto International*, 33(3), 310-320.
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583-594.

Landslide Susceptibility Mapping in Bitlis Province using GIS-based AHP method

CBS Tabanlı AHP Yöntemi Kullanılarak Bitlis İlinin Heyelan Duyarlılık Haritalaması

M. Cihan Aydın¹, Elif Sevgi Birincioğlu¹, Aydın Büyüksaraç^{2*}

¹Bitlis Eren University, Department of Civil Engineering, TR-13000 Bitlis/Turkey.

²Çanakkale Onsekiz Mart University, Çan Vocational School, TR-17400 Çanakkale/Turkey.

ORIGINAL PAPER

*Corresponding author:

Aydın Büyüksaraç
absarac@comu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1119723

Article history

Received: 22.05.2022

Accepted: 06.09.2022

Published: 18.09.2022

Abstract

This study presents the landslide susceptibility assessment of the region by considering the landslide-susceptible hazard factors such as slope, precipitation, soil, lithology, distance to the river, land use, elevation, aspect, and distance to active faults as well as historical landslide events and population throughout the province of Bitlis. For this purpose, a GIS-based Analytical Hierarchy Process (AHP) was used as an effective method in multiple decision-making methods. The results showed that approximately 25% of the study area has moderate to high landslide susceptibility. Accordingly, the landslide susceptibility of the study area is high, especially in the southwest and southeast parts of the study area which have mountainous and deep river valleys, and the partially mountainous regions in the north. Compared with previous landslide records and similar susceptibility maps in the literature, the results were found to be quite successful in determining landslide susceptibility of the study area. However, risk assessment wasn't made within the scope of the study.

Keywords: Landslide susceptibility, Analytical Hierarchy Process (AHP), GIS

Özet

Bu çalışma, Bitlis ili genelinde eğim, yağış, toprak, litoloji, akarsuya olan mesafe, arazi kullanımı, yükseklik, bakı ve aktif faylara olan uzaklık gibi heyelana duyarlı tehlike faktörlerinin yansıra tarihsel heyelan olayları ve nüfus yoğunluğu dikkate alarak bölgenin heyelan duyarlılık değerlendirmesini sunmaktadır. Bu amaçla çoklu karar verme yöntemlerinde etkin bir yöntem olarak CBS tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) kullanılmıştır. Sonuçlar, çalışma alanının yaklaşık %25'inin orta ila yüksek heyelan duyarlılığına sahip olduğunu göstermiştir. Buna göre, çalışma alanının özellikle dağlık ve derin akarsu vadilerinin bulunduğu güneybatı ve güneydoğu kesimlerinde ve kuzeyde kısmen dağlık bölgelerde heyelan duyarlılığı yüksektir. Literatürdeki önceki heyelan kayıtları ve benzer duyarlılık haritaları ile karşılaştırıldığında, sonuçların çalışma alanının heyelan duyarlılığını belirlemede oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Ancak çalışma kapsamında risk değerlendirmesi yapılmamıştır.

Anahtar kelimeler: Heyelan duyarlılık, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), CBS

1. Introduction

Landslide is one of the natural disasters that cause the most loss of life and property in the world. It poses a significant hazard source, especially for loos, steep and mountainous terrain. It is stated that landslides can be induced by the interactivity of several factors such as earthquakes, intense rainfall, geology, land cover, slope geometry, groundwater saturation, vegetation cover, and human influences (Pradhan et al., 2011; Rawat and Joshi, 2012).

Hasekioğulları and Ercanoğlu (2012) aimed to investigate the parameter effects in preparing landslide susceptibility maps with a data-driven approach and to adapt this approach to AHP. They considered a total of 13 input parameters such as slope, aspect, plan curvature, topographical elevation, vegetation cover index, land use in the AHP assessment methodology for the landslide susceptibility of their study area in the Western Black Sea region of Turkey.

Mansouri Daneshvar (2014) aimed to map landslide susceptibility using AHP for recognition of a hazardous zone in northeast of Iran. Althuwaynee et al. (2016) introduced three main methods for landslide-susceptibility analysis based on the literature as the deterministic, the qualitative/heuristic and the probabilistic approach. Qualitative methods are based entirely on the opinion of the expert who makes the risk assessment and therefore can be evaluated subjectively (Aleotti and Chowdhury, 1999). One of the most effective and preferred methods in qualitative methods for susceptibility assessment is the analytical hierarchy process (AHP). Many researchers in the literature used different versions of AHP approach for successful landslide susceptibility analysis. Özşahin (2015) conducted the landslide susceptibility analysis of Ganos Mountain (Tekirdağ) with the help of GIS and determined that the landslide potential in Ganos Mountain is at a moderate level. However, he identified areas of the mountain area with very low, low, high and very high landslide susceptibility. This study showed that GIS techniques give more effective results than AHP method in the preparation of landslide susceptibility maps. Althuwaynee et al. (2016) used an integrated methodology combining an automatic interaction detection model with analytic hierarchy process (AHP) to assess a medium-scale landslide susceptibility for their study area. Chen et al. (2016) aimed to map the landslide susceptibility using the AHP and certain factor (CF) models based geographic information system (GIS) for a region in China. They considered slope degree, slope aspect, plan curvature, altitude, geomorphology, lithology, distance from faults, distance from rivers and precipitation as landslide conditioning factors. Their results showed the accuracy of the AHP was approximately 78%. Kumar and Anbalagan (2016) presented a study of AHP method in landslide susceptibility mapping (LSM) for a region of Tehri reservoir in India. The results obtained from the study reached a reasonable accuracy of approximately 79%. Myronidis et al. (2016) developed a landslide susceptibility model by coupling the AHP and the frequency ratio method in a GIS environment for a landslide-prone site of Cyprus. Rahim et al. (2018) generated a landslide susceptibility map based on twelve causative factors such as slope, aspect, elevation, drainage network, stream power index, topographic witnesses, lithology, fault lines, rainfall, road network, land cover and soil texture using GIS-based AHP. In the study, nine topographic, geomorphological, and climatic parameters affecting landslide susceptibility were considered. Mokarram and Zarei (2018) applied a GIS-based fuzzy-AHP approach to determinate the landslide susceptibility mapping in a region of Iran. They considered some input criteria for the model such as the digital elevation model, lithology, slope, land use, river, road, fault, and precipitation. Acar (2019) analyzed the landslide susceptibility map of the Inebolu basin in Turkey with the help of a GIS-based AHP, taking into account decision-making criteria such as slope, aspect, elevation, curvature, land use, lithology, and distance to the river. El Jazouli et al. (2019) produced a landslide susceptibility map using GIS-based AHP approach, considering some landslide-related factors, including land cover, lithology, distance to road, distance to fault, distance to drainage network, elevation, aspect, and slope gradient. Nguyen and Liu (2019) proposed a new approach for AHP combining of bivariate analysis with correlation statistics to evaluate the importance of the pairwise comparison. Rather than scaling expert opinions, they aimed to establish a correlation between actual landslide events and relevant criteria.

In recent years, artificial neural network techniques have been used in the determination of natural disaster susceptibility in many areas. Ermini et al. (2005) aimed to define a method with the ability to forecast landslide susceptibility through the application of artificial neural networks, which allows black-box models to be implemented, similar to some other statistical approaches (Carrara et al., 1991 and 1995). Such studies encouraged systematic approaches such as ANN-based statistical methods in landslide susceptibility and mapping. Reichenbach et al. (2018), based on a comprehensive review, stated that the range of thematic data types used for susceptibility assessment has not changed significantly with time. They also pointed out that the most common statistical methods for landslide susceptibility modelling are logistic regression, neural network analysis, data-overlay, index-based and machine learning methods with an increasing preference in the recent years. Machine learning techniques have become a method frequently preferred by researchers in recent years. Merghadi et al. (2020) presented an overview of the most popular machine learning techniques available for landslide susceptibility studies. They performed an extensive comparison analysis between different machine learning techniques using a case study from Algeria, and they stated that tree-based ensemble algorithms achieve excellent results compared to other machine learning algorithms and that the Random Forest algorithm offers robust performance for accurate landslide susceptibility mapping with only a small number of adjustments required before training the model (Merghadi et al., 2020). In order to determine the height ranges of landslides, the effect of elevation on landslides was examined by reviewing the grade ranges and elevation values used by Çellek (2020) and applied to the map sections selected from Turkey.

This brief literature review shows that the AHP is a highly capable approach in the analysis of landslide susceptibility because it involves multi-criteria decision-making process. Some researchers such as Göksu (2017) and Ekinçi (2020a) studied the landslide susceptibility and natural disaster diversity of the same region (Bitlis), but no study has been

carried out in this context for the region before.). This study presents a susceptibility analysis of the Bitlis province of Turkey using GIS-based AHP and considering some hazard and susceptibility factors.

2. Study Area

The province of Bitlis, chosen as the study area, is one of the regions with the highest landslide susceptibility in Turkey due to its topographic, geological, and climatic properties (Figure 1). Especially the southern parts of the study area are mountainous, stems and deep valleys. The settlements and access roads in the mountainous south are generally located in deep river valleys. The upper geological structure of the region consists of lava and ignimbrite layers originating from the Nemrut Caldera (Ulusoy et al., 2019). In these areas, ignimbrite layers loosen due to meteorological conditions such as snow, rain, frost, and groundwater, causing rockfall. On the other hand, alluvial loose soil layer collected in hard lava rock beds and valleys is very sensitive to landslides. Three main tectonostratigraphic units are observed in the region, which are located on top of each other with tectonic contact (Göncüoğlu and Turhan, 1983). The uppermost part of these units is called as Bitlis metamorphic zone. On the other hand, the study area has a very variable structure in terms of seasonal climate change. Aydın et al. (2015) explained the reason for this as a micro-climatic feature display in which climate transitions occur in the region. Due to the collision of the cold and humid air in the north with the hot air in the south, sudden precipitation with significant temperature differences between seasons can trigger landslides in the region. In addition, the study area is in the Eastern Anatolia Region, which is a very active region in terms of seismicity. The region is mainly controlled by the northward movement of the Arabian plate and the collision of the Anatolian plate along the deformation zone called the Bitlis zone. These seismic features cause major earthquakes in the region (Işık, 2010; Işık et al., 2012; Işık et al., 2020; Ekinci et al., 2020b). All these situations make the study area highly susceptible to landslides. The study area is among the provinces in Turkey where landslide/rockfall events occur the most with 412 events between 1950 and 2019.

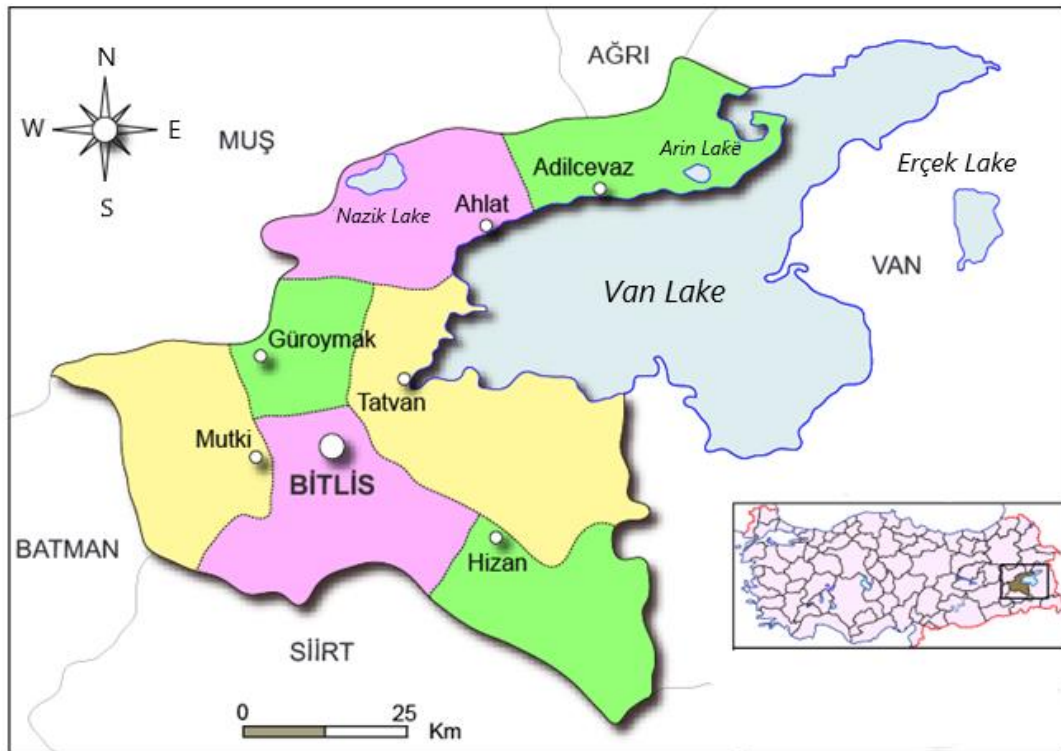


Figure 1. Location map of the study area (after Saygılı, 2015)

3. Methodology

The study area is a mountainous region with extreme climatic conditions, various soil, seismic and geological (such as volcanic and tectonic) structures. Therefore, many factors can trigger the landslide event. For this reason, a multiple decision-making method such as AHP was chosen as a very suitable method for determining the landslide susceptibility of the study area.

AHP, introduced by Saaty (1980), is a flexible approach that can be adapted to many different multi-criteria decision-making problems. To manage the decision-making process, this method includes some layers such as decision stages in which the selected criteria are scored and the stages of determining alternative values. Once the AHP schema is established, pairwise comparison matrices are defined between the effective criteria. Each criterion is scored in accordance with Table 1 considering the importance level of the comparison pairs.

Table 1. Importance intensities for pairwise comparison in AHP (Saaty, 1990; Wang et al., 2008)

Importance intensity (Scores)	Definition
1	Equal importance
3	Moderate importance of one over another
5	Strong importance of one over another
7	Very strong importance of one over another
9	Extreme importance of one over another
2, 4, 6, 8	Intermediate values
Reciprocals	Reciprocals for inverse comparison

Saaty (1980) presented the principal right eigenvector method to determine weight vector for AHP. The normalized matrix is derived by dividing each element of the comparison matrix by the sum of the corresponding columns. Each vector in the normalized matrix is averaged to obtain the weight vector. The priorities matrix is obtained by multiplying the comparison matrix and the weight vector as;

$$[AW_i] = [A][W_i] \tag{1}$$

The maximum eigenvalue (λ_{max}) can be also formulized as below:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{AW_i}{W_i} \tag{2}$$

where, n is criteria number, A is the pairwise comparison matrix, W is the weight vector. The consistency ratio of the pairwise comparison matrix define by CR should have an acceptable ratio (Wang et al. 2008):

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)RI} \tag{3}$$

In which, the CI is the consistency index, RI is the random inconsistency index taken from Table 2.

Table 2. RI values according to numbers of criteria (n = 1 – 15) (Saaty, 1990)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

For acceptable consistency, the decision-making process should be repeated until this ratio of CR drops below 0.10. CR = 0.00 represents the best consistency for the decision-making process (Saaty, 1990; Subramanian and Ramanathan, 2012).

4. Susceptibility Analysis

The success of AHP largely depends on the correct selection of the criteria affecting the event and the accuracy in the scoring of the decision makers. In this study, some factors that affect and are affected by the landslide event in the study area are considered. The criteria that can trigger the landslide event can be defined as hazard, and that can be affected can be described as vulnerability factors. The hazard factors in the study were slope, precipitation, soil, lithology, distance to river, land use, elevation, aspect, and distance to fault. The data of all these criteria were collected from the relevant institutions (HGM, 2021; USGS, 2021; Geofabrik, 2021; TAD, 2021; Copernicus, 2021; MTA, 2021; MGM, 2021; Climate-Data, 2021; AFAD, 2021). For each criterion, these data sets were divided into subclasses and mapped with the help of GIS as shown in Figure 2.

Each zone on the maps in Figure 2 was scored according to landslide susceptibility (Figure 3). While selecting these criteria in Figures 2 and 3, all relevant institutions' open databases were scanned in detail, and important factors that could affect landslide susceptibility were taken into account. Thus, a multi-faceted and more sensitive study on the landslide susceptibility of the region was aimed.

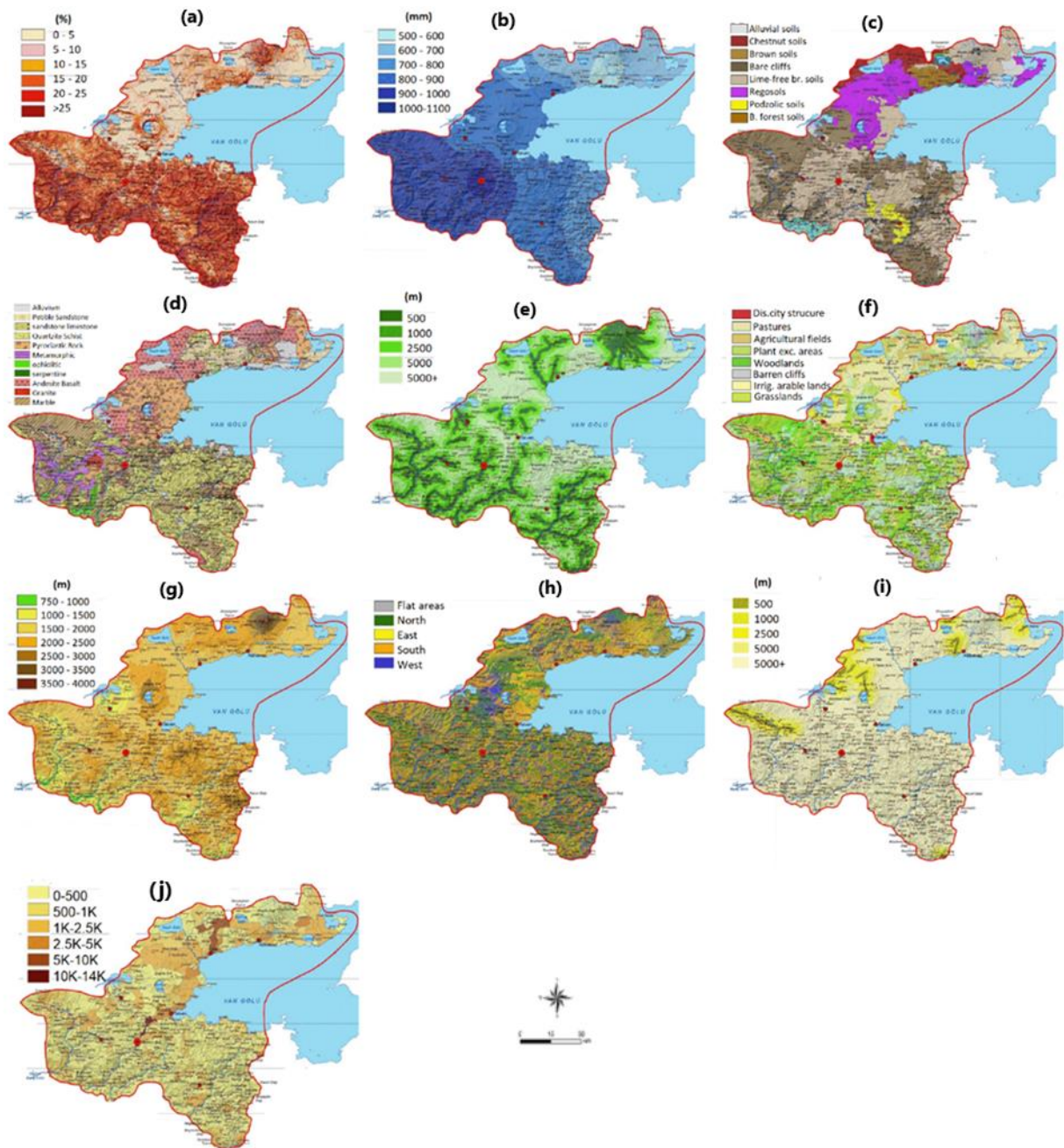


Figure 2. Sub-classification maps of each criterion prepared according to the data obtained from the relevant institutions: a) slope, b) precipitation, c) soil, d) lithology, e) distance to rivers, f) land use, g) elevation, h) aspect, i) distance to active faults, j) population

In Figure 3a, landslide events that occurred in the past in the study area are shown. According to this, the landslides are concentrated in the north, but generally spread in the southern regions. This map with past records will enhance the final map. One of the most important factors that can affect landslide susceptibility is slope. Therefore, in the map given in Figure 3b, zones with high slopes were scored high. Another important criterion that triggers landslides is precipitation. Water seeping into the ground due to precipitation may trigger landslides. For this reason, the northwest region with high precipitation was scored high as seen in Figure 3c. As the soil structure, especially barren brown soils, chestnut-colored soils, and river oil zones were evaluated as high sensitivity.

The landslide susceptibility of the regosols located on a relatively flat land in the middle region and the forest soils located in the river valleys in the west and southeast were evaluated as low (Figure 3d). In terms of lithology, rocks such as marble, granite, andesite basalt and metamorphic rocks in the southern part of the study area have low landslide susceptibility. On the other hand, the susceptibility of alluvial, conglomerate, sandstone, etc. formations in the northern parts are higher (Figure 3e). River valleys are zones where slopes are high.

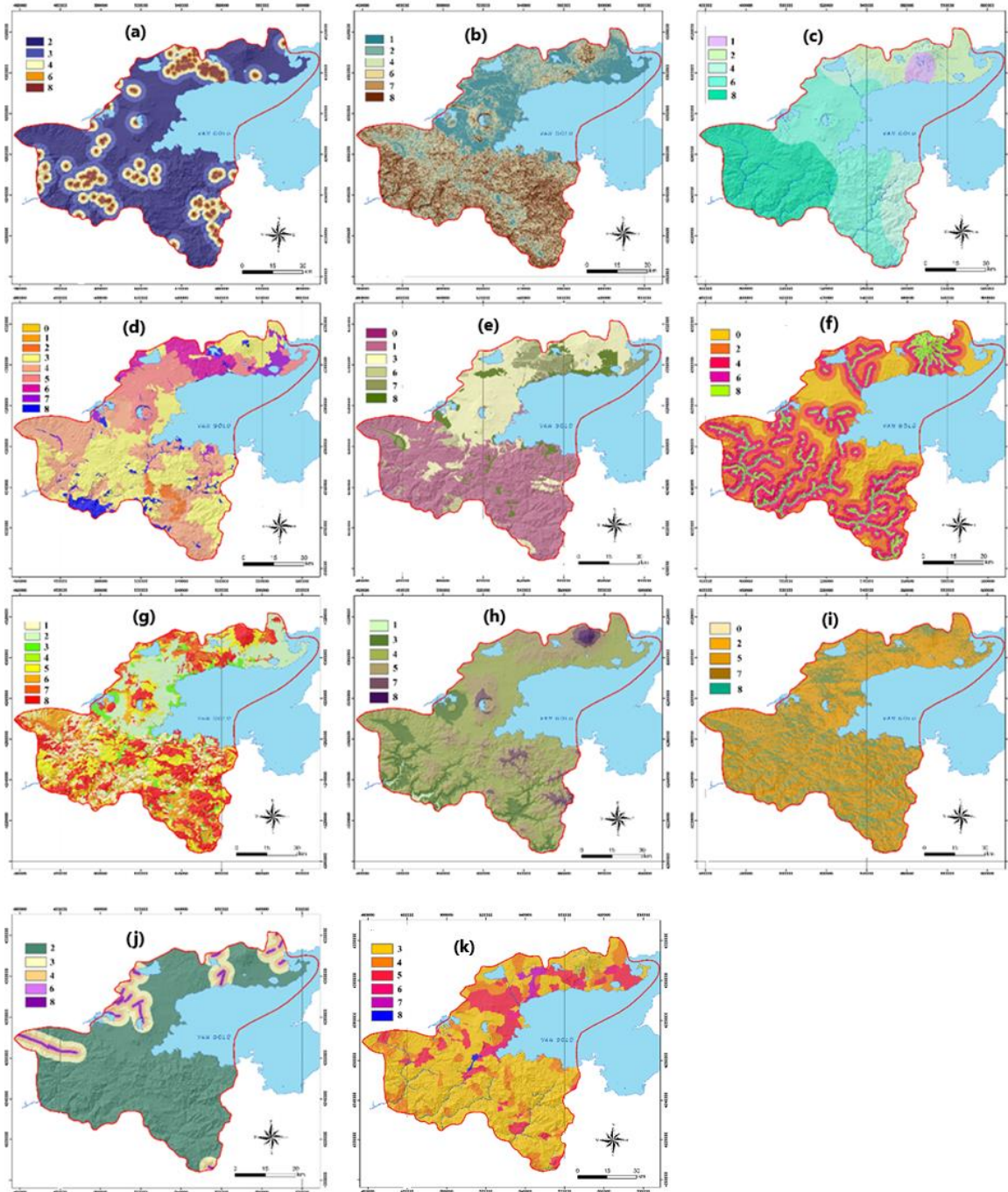


Figure 3. Scored maps a) landslide events, b) slope, c) precipitation, d) soil, e) lithology, f) distance to rivers, g) land use, h) elevation, i) aspect, j) distance to active faults, k) population of the criteria for landslide susceptibility

The closer to the river, the higher landslide susceptibility (Figure 3f). Figure 3g shows the scoring of land use on landslide susceptibility. In this map, vegetation with deep root structure such as forests and wooded areas was selected with low sensitivity.

However, sections with relatively lower slopes such as pastures and irrigable areas were also considered to have an average sensitivity. The areas with weak vegetation or bare lands were highly susceptible to landslides.

As can be seen in Figure 3h, the elevation is scored as a factor that increases landslide susceptibility. In the aspect map in Figure 3i, the landslide susceptibility is higher in south-facing zones than in the north since freeze-thaw would be more common in southern regions. Another factor that can trigger a landslide is an earthquake. The areas close to the active fault line given in Figure 3j is more susceptible to landslides. Finally, the population density is given in Figure 3k as a factor increasing the landslide susceptibility.

Human activities such as excavation, construction and un-planting may increase the landslide susceptibility on the ground, as well as increase the landslide vulnerability in the areas due to population density. The superiority of each criterion of the comparison matrix over the other was scored using the scale in Table 3, and thus the pairwise comparison matrix is obtained as in Table 3. Then, each element of this matrix is divided by the corresponding column sum to gain the normalized matrix given in Table 4.

Table 3. The pairwise comparison matrix for landslide susceptibility of the region (a-landslide events, b-slope, c-precipitation, d-soil, e-lithology, f-distance to rivers, g-land use, h-elevation, i-aspect, j-distance to active faults, k-population)

A	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
a	1	2	3	3	3	3	3	4	5	5	7
b	1/2	1	3	3	3	4	5	5	5	7	7
c	1/3	1/3	1	3	3	5	5	7	7	7	7
d	1/3	1/3	1/3	1	1	2	3	3	7	7	5
e	1/3	1/3	1/3	1	1	3	3	4	4	4	5
f	1/3	1/4	1/5	1/2	1/3	1	3	3	5	2	5
g	1/3	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1	2	2	2	5
h	1/4	1/5	1/7	1/3	1/4	1/3	1/2	1	2	2	3
i	1/5	1/5	1/7	1/7	1/4	1/5	1/2	1/2	1	1	3
j	1/5	1/7	1/7	1/7	1/4	1/2	1/2	1/2	1	1	3
k	1/7	1/7	1/7	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1
TOTAL	3.96	5.14	8.64	12.65	12.62	19.57	24.70	30.33	39.33	38.33	51.00

Table 4. Process of the weight vector from the normalization matrix (a-landslide events, b-slope, c-precipitation, d-soil, e-lithology, f-distance to rivers, g-land use, h-elevation, i-aspect, j-distance to active faults, k-population)

A	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	Wi
a	0.253	0.389	0.347	0.237	0.238	0.153	0.121	0.132	0.127	0.130	0.137	0.206
b	0.126	0.195	0.347	0.237	0.238	0.204	0.202	0.165	0.127	0.183	0.137	0.197
c	0.084	0.065	0.116	0.237	0.238	0.256	0.202	0.231	0.178	0.183	0.137	0.175
d	0.084	0.065	0.039	0.079	0.079	0.102	0.121	0.099	0.178	0.183	0.098	0.102
e	0.084	0.065	0.039	0.079	0.079	0.153	0.121	0.132	0.102	0.104	0.098	0.096
f	0.084	0.049	0.023	0.040	0.026	0.051	0.121	0.099	0.127	0.052	0.098	0.070
g	0.084	0.039	0.023	0.026	0.026	0.017	0.040	0.066	0.051	0.052	0.098	0.048
h	0.063	0.039	0.017	0.026	0.020	0.017	0.020	0.033	0.051	0.052	0.059	0.036
i	0.051	0.039	0.017	0.011	0.020	0.010	0.020	0.016	0.025	0.026	0.059	0.027
j	0.051	0.028	0.017	0.011	0.020	0.026	0.020	0.016	0.025	0.026	0.059	0.027
k	0.036	0.028	0.017	0.016	0.016	0.010	0.008	0.011	0.008	0.009	0.020	0.016

Result mapping and classification processes were performed with ArcGIS, a GIS software. For this, raster data was reclassified by means of ArcToolbox -3D Analyst Tools - Raster - Reclass. After the classification process, the data was converted into vector data via Conversion Tools – From Raster – Raster to Polygon. Then, vector data was integrated with Data Management Tools – Generalization – Dissolve. Data Management Tools- Fields – Add Field tool is used to enter the scoring values into the attribute table of each criterion.

The average of each row of the normalized matrix is calculated in the last column as the weights of the criteria representing this row. According to the determined weights, the maximum eigenvalue was calculated as $\lambda_{max}=12$ from Eq. (2). The consistency ratio, CR, was also calculated as 0.07 from Eq. (3), and since this value is less than 0.10, it can be said that the comparison matrix has an acceptable consistency. Consequence, the weights of the criteria on landslide susceptibility were calculated as follows: 20.6% for landslide, 19.7% for slope, 17.5% for precipitation, 10.2% for soil, 9.6% for lithology, 7.0% for distance to rivers, 4.8% for land use, 3.6% for elevation, 2.7% for aspect, 2.7 for fault distance and 1.6% for population. These weights were implemented to layers of the criteria maps in GIS environments to create the result maps of landslide susceptibility.

5. Results and Discussion

The raster map layers in Figure 3 were weighted with the ratios obtained from the AHP, and the landslide susceptibility map was obtained in the GIS environment. In the map shown in Figure 4, the landslide susceptibility is colored in five different degrees, as very low susceptible, low susceptible, moderate susceptible, high and very high susceptible. According to this map, approximately 8% of the study area is susceptible to landslides at very low levels, 66% at low levels, 25% at medium and high levels, and 1% at very high levels (Table 5). Accordingly, especially the mountainous southwestern parts of the study area are high-susceptible areas, while the central and northern parts are considered low-susceptible areas. Steep sections with deep aquifer valleys are areas with high landslide susceptibility. A similar situation is also valid for the river valley in the southeast of the study area. In addition, relatively mountainous areas with a sandstone lithological structure in the northern parts are susceptible to landslides.

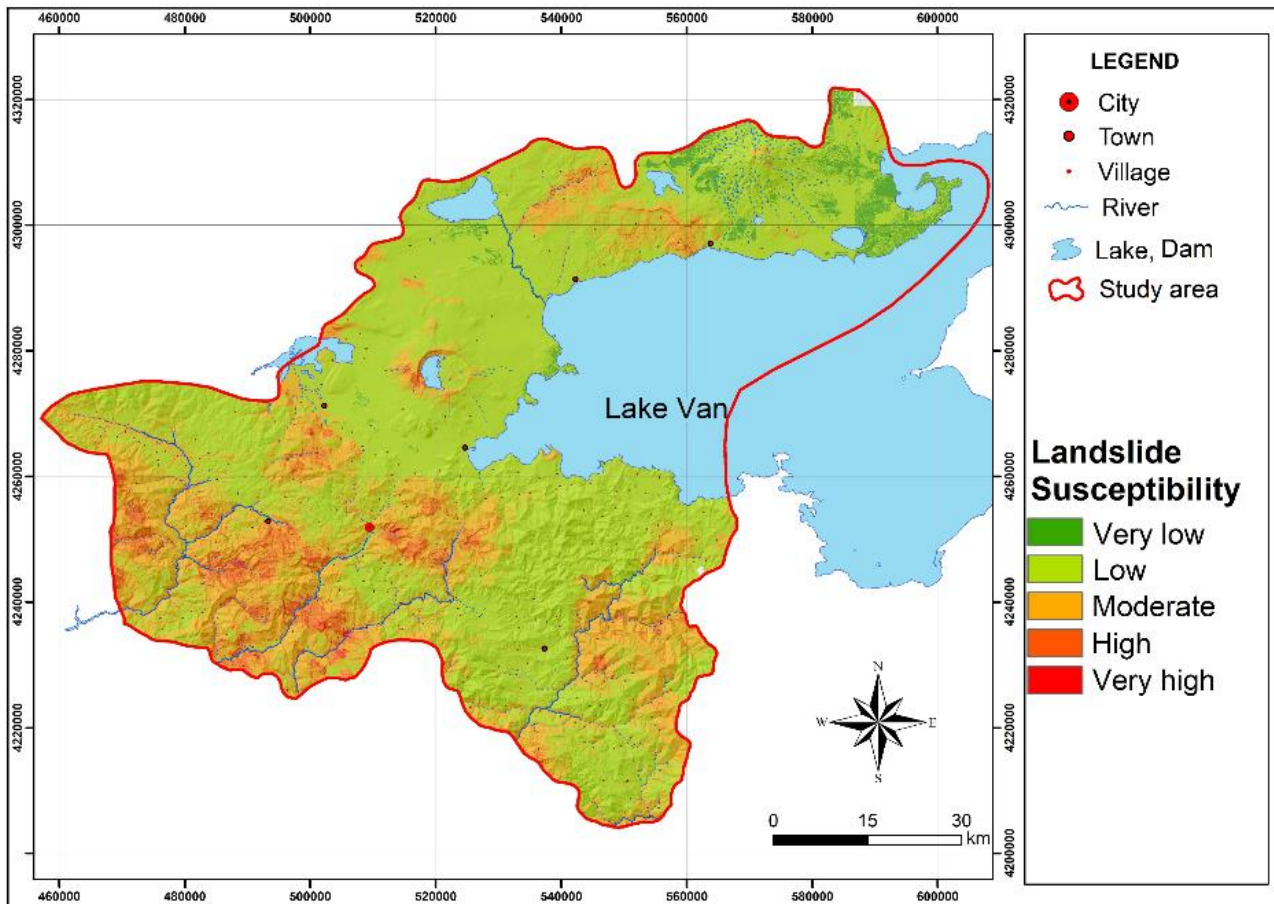


Figure 4. Final landslide susceptibility map of the study area

To test the accuracy of the map, it was also compared with some maps from the literature given in Figure 5. Figure 5a shows the landslide susceptibility map of the study area prepared by Göksu (2017). Ekinci et al. (2020a) also showed the historical landslides in the study area on the map in Figure 5b. Since there is no accuracy analysis or comparison about Göksu's (2017) map, the reliability of this map is not completely known, but it is seen that especially the parts with high landslide susceptibility overlap with the results of this study (Figures 4 and 5a). On the other hand, the landslide susceptibility map obtained from this study is in good agreement with the observed landslide records on the map presented by Ekinci et al. (2020a) (Figures 4 and 5b). In general, Figures 4 and 5 showed that the landslide susceptibility is concentrated in the southeast and southwest and partially in the north. Although no comprehensive accuracy assessment or analysis were performed, these comparisons demonstrate the validity and reasonable accuracy of the results obtained for the study area.

Table 5. Spatial distribution of landslide susceptibility classes and ranges

Landslide Susceptibility Classes	Landslide Susceptibility Ranges	Area (km ²)	Ratio (%)
Very Low	0 – 0.19	536.56	8
Low	0.20 – 0.39	4426.62	66
Moderate	0.40 – 0.59	1676.75	25
High	0.60 – 0.79		
Very High	0.80 – 0.99	67.07	1
TOTAL		6707	100

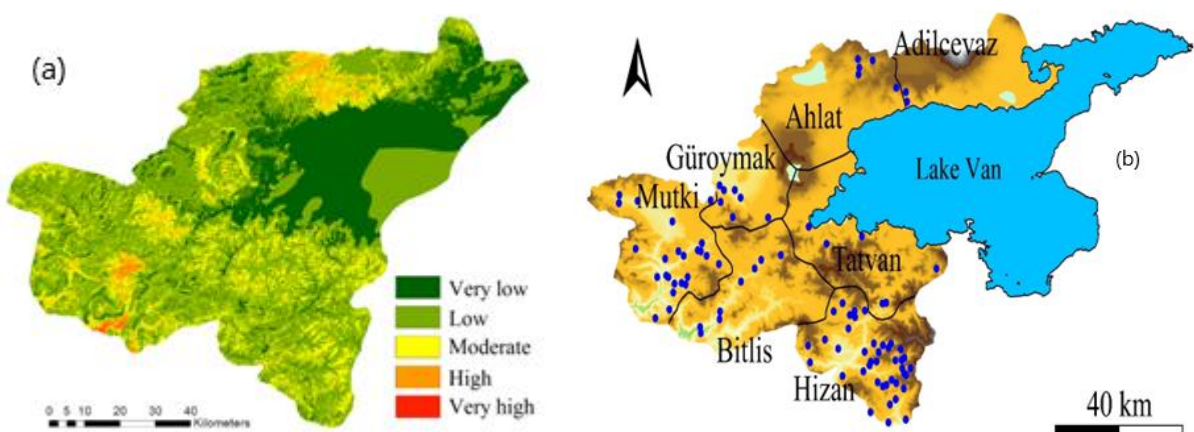


Figure 5. Literature records on landslide susceptibility of the study area: a) landslide susceptibility map (Göksu, 2017), b) past landslide records in the study area (Ekinci et al., 2020a)

6. Conclusions

In this study, landslide susceptibility maps of Bitlis province, located in the Eastern Anatolia Region of Turkey, where relatively mountainous and landslide events are common, were obtained by applying GIS-based AHP. The important factors in the landslide susceptibility of the region are slope, precipitation, soil structure and lithology as well as past landslide events (inventory) and population. The results indicate that approximately 25% of the study area has moderate to high landslide susceptibility. Accordingly, the landslide susceptibility of the study area is high, especially in the southwest and southeast parts of the study area (Mutki, Bitlis and Hizan) due to the mountainous structures and deep river valleys, and in the partially mountainous regions in the north (the region between Ahlat and Adilcevaz). The landslide susceptibility in the middle parts of the region where Güroymak, Ahlat and Tatvan districts are located is low. Although the previous landslide records and some other studies in the literature support the results of the study, this study reflects the landslide susceptibility of the area much better. The main reason for this is that eleven different criteria were considered with a logical filter in the used method. It is expected that the results obtained will contribute to the disaster management of the region.

Some limitations, advantages and disadvantages of this study can be presented as follows. First, it depends on the accuracy of the results and the availability of sufficiency and the accuracy of the data sets. The field of study and expertise of the decision makers and the scoring of the criteria are the most important factors on the robustness of the results. In addition, the selection of effective criteria on the event is important. For this reason, the effective criteria on the event should be selected and defined correctly. With this method, which offers a qualitative approach, the deterministic and probabilistic aspects of the event are ignored. On the other hand, it is possible to get very simple, effective, fast and accurate results thanks to AHP with accurate data set usage, multiple-decision mechanism and flexible expert opinions. In addition, it should be noted that the accuracy of the results in this study was not tested with any Accuracy Assessment technique, their validity was checked only by comparing them with similar studies and real event records. For better accuracy analysis, it is recommended to test the model accuracy with the techniques such as ROC curve in the literature.

Acknowledgements

We are grateful to editor, anonymous reviewers for their constructive comments and suggestions. This study has been derived from a part of Elif Sevgi Birincioğlu's (2021) master thesis.

References

- Acar, E. (2019). *Production of landslide susceptibility maps by using AHP method and GIS analyses* (Master's thesis). Hacettepe University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Geological Engineering, Ankara.
- AFAD. (2021, July 01). 2020 yılı doğa kaynaklı olay istatistikleri. Retrieved from https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/e_Kutuphane/Istatistikler/2020yilidogakaynakliolayistatistikleri.pdf
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(1), 21–44.
- Althuwaynee, O.F., Pradhan, B., & Lee, S. (2016). A novel integrated model for assessing landslide susceptibility mapping using CHAID and AHP pair-wise comparison. *International Journal of Remote Sensing*, 37(5), 1190–1209.
- Aydın, M.C., & Işık, E. (2015). Evaluation of Ground Snow Loads in the Micro-climate Regions. *Russian Meteorology and Hydrology*, 40(11), 741–748.
- Birincioğlu-Sevği, E. (2021). *Disaster risk analysis of Bitlis province using geographical information systems and analytical hierarchy method* (Master's thesis). Bitlis Eren University Graduate Education Institute, Department of Emergency and Disaster Management, Bitlis.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427–445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guazzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS techniques in mapping landslide hazard. In A. Carrara, & F. Guzzetti (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards* (pp. 135–175). The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Chen, W., Li, W., Chai, H., Hou, E., Li, X., & Ding, X. (2016). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) and certainty factor (CF) models for the Baozhong region of Baoji City, China. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), 63. doi: 10.1007/s12665-015-4795-7.
- Climate-Data. (2021, December 16). Climate data for cities around the world. Retrieved from <https://tr.climate-data.org>
- Copernicus. (2021, December 16). Data of land use from Copernicus Land Monitoring Service. Retrieved from <https://land.copernicus.eu>.
- Çellek, S. (2020). Morphological parameters causing landslides: a case study of elevation. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 162, 197-224.
- Ekinci, R., Büyüksaraç, A., Ekinci, Y.L., & Işık, E. (2020a). Bitlis ilinin doğal afet çeşitliliğinin değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1), 1-11.
- Ekinci, Y.L., Büyüksaraç, A., Bektaş, O., & Ertekin, C. (2020b). Geophysical Investigation of Mount Nemrut Stratovolcano (Bitlis, Eastern Turkey) Through Aeromagnetic Anomaly Analyses. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 3243–326.
- El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 6(1), 3. doi: 10.1186/s40677-019-0119-7.
- Ermimi, L., Catani, F., & Casagli, N. (2005). Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66, 327–343.
- Geofabrik. (2021, December 16). Maps and Data. Retrieved from <https://www.geofabrik.de/data>.

- Göksu, A. E. (2017). Landslide Susceptibility Analysis Report. Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD), Bitlis, Turkey.
- Göncüoğlu, M. C., & Turhan, N. (1983). New Results on the Age of Bitlis Metamorphics. *Bulletin of the Mineral, Research and Exploration*, 95-96, 44-48.
- Hasekioğulları, G. D., & Ercanoğlu, M. (2012). A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabük, NW Turkey). *Natural Hazards*, 63(2), 1157-1179.
- HGM. (2021, December 16). Republic of Türkiye Ministry of National Defense General Directorate of Mapping. Turkish administrative borders data. Retrieved from <https://www.harita.gov.tr>.
- Işık, E. (2010). *Bitlis City Earthquake Performance Analysis* (Doctoral dissertation). Sakarya University, Graduate School of Natural and Applied Science, Sakarya.
- Işık, E., Aydın, M. C., Bakış, A., & Özlük, M. H. (2012). The faults near Bitlis and seismicity of the region. *BEU Journal of Science*, 1(2), 153-169.
- Işık, E., Aydın, M. C., & Büyüksaraç, A. (2020). 24 January 2020 Sivrice (Elazığ) earthquake damages and determination of earthquake parameters in the region. *Earthquakes and Structures*, 19(2), 145-156.
- Kumar, R., & Anbalagan, R. (2016). Landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process (AHP) in Tehri reservoir rim region, Uttarakhand. *Journal of the Geological Society of India*, 87(3), 271-286.
- Mansouri Daneshvar, M. R. (2014). Landslide susceptibility zonation using analytical hierarchy process and GIS for the Bojnurd region, northeast of Iran. *Landslides*, 11(6), 1079-1091.
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Bui, D. T., Avtar, R., & Abderrahmane, B. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, 207, 103225. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103225.
- MGM. (2021, December 16). Precipitation Data, Climate-Data, Turkish State Meteorological Service. Retrieved from <https://www.mgm.gov.tr>.
- Mokarram, M., & Zarei, A.R. (2018). Landslide susceptibility mapping using fuzzy-AHP. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(6), 3931-3943.
- Myronidis, D., Papageorgiou, C., & Theophanous, S. (2016) Landslide susceptibility mapping based on landslide history and analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, 81(1), 245-263.
- MTA. (2021, December 16). Data of geological structure from geoscience map viewer and drawing editor, General Directorate of Mineral Research and Exploration of Turkey. Retrieved from <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>.
- Nguyen, T. T. N., & Liu, C. C. (2019). A new approach using AHP to generate landslide susceptibility maps in the Chen-Yu-Lan Watershed, Taiwan. *Sensors*, 19(3), 505. doi: 10.3390/s19030505.
- Özşahin, E. (2015). Coğrafi Bilgi Sistemleri yardımıyla heyelan duyarlılık analizi: Ganos Dağı örneği (Tekirdağ). *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 47-63.
- Pradhan, B., Mansor, S., Pirasteh, S., & Buchroithner, M. F. (2011). Landslide Hazard and Risk Analyses at a Landslide Prone Catchment Area Using Statistical Based Geospatial Model. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 4075-4087.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60-91.
- Rahim, I., Ali, S. M., & Aslam, M. (2018). GIS Based landslide susceptibility mapping with application of analytical hierarchy process in District Ghizer, Gilgit Baltistan Pakistan. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 6(2), 34-49.
- Rawat, J. S., & Joshi, R. C. (2012). Remote-Sensing and GIS-Based Landslide-Susceptibility Zonation Using the Landslide Index Method in Igo River Basin, Eastern Himalaya, India. *International Journal of Remote Sensing*, 33(12), 3751-3767.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy processes*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
- Saygılı, R. (2015). Coğrafya şekil. Retrieved from <https://www.harita.gov.tr>.
- Subramanian, N., & Ramanathan, R. (2012). A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management. *International Journal of Production Economics*, 138, 215-241.
- TAD. (2021, December 16). Agricultural Land Evaluation Portal (TAD Portal), Republic of Turkey Ministry of Agriculture and Forestry General Directorate of Agricultural Reform. Retrieved from <https://www.tarimorman.gov.tr>.
- Ulusoy, İ., Çubukçu, H.E., Mouralis, D., & Aydar, E. (2019). Nemrut Caldera and Eastern Anatolian Volcanoes: Fire in the Highlands. In C. Kuzucuoğlu, A. Çiner & N. Kazancı (Eds.), *Landscapes and Landforms of Turkey* (pp. 589-599). Springer, Cham.

- USGS. (2021, December 16). EarthData and Digital Elevation Model (DEM) for Bitlis province, United States Geological Survey (USGS). Retrieved from <https://www.usgs.gov>.
- Wang, Y., Liu J., & Elhag, T. (2008). An Integrated AHP-DEA methodology for bridge risk assessment. *Computers and Industrial Engineering*, 54(3), 513-525.

Gerçek Evapotranspirasyonun Landsat Uydu Görüntüleri Kullanarak SEBAL Modeli ile Hesaplanması: Bolu/Yeniçağa Örneği

The Estimation of Actual Evapotranspiration by the SEBAL Model Using the Landsat Satellite Images: A Case Study of Yenicaga, Bolu

Atahan Evcen¹, Ali Levent Yağcı^{1*}

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Ali Levent Yağcı
alyagci@gtu.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1126221

Yayın süreci

Geliş tarihi: 05.06.2022
Kabul tarihi: 07.08.2022
Basım tarihi: 18.09.2022

Özet

Su yönetiminin en önemli basamaklarından biri, su bütçesinin yüksek doğruluklu bir şekilde hesaplanmasıdır. Su bütçesinde yağıştan sonraki en önemli parametre gerçek evapotranspirasyondur (ET). ET, bitki yüzeyinden terleme ve toprak yüzeyinden buharlaşma ile kaybolan su miktarının toplamıdır. Bu çalışmada ET'nin Landsat 5 ve Landsat 8 uydu görüntüleri kullanarak SEBAL modeli ile hesaplanması ve modelin doğruluğunun yersel veriler kullanarak test edilmesi amaçlanmıştır. SEBAL modeli ile üretilen ET haritaları, 2010-2014 yılları arasında Bolu Yeniçağa Gölü'nün kuzey tarafında kurulan yersel akı kulesinde eddy kovaryans yöntemi ile toplanan gözlemler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uydu görüntülerinden SEBAL modelinden hesaplanan ET değerleri ile yersel verilerden hesaplanan günlük ET değerleri arasında güçlü bir ilişki bulunmuştur ($R^2=0.83$). Ayrıca, model yersel veriye göre günlük toplam ET değerlerini 0.04 mm fazla (pozitif bias) hesaplamıştır. Modelin yersel verilere göre mutlak ortalama ve karesel ortalama hata değerleri sırasıyla günlük 0.63 mm ve 0.71 mm bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Uzaktan algılama, Gerçek evapotranspirasyon, SEBAL, Eddy kovaryans yöntemi, Landsat

Abstract

One of the most prominent steps in water management is the accurate estimation of the water budget terms. Evapotranspiration (ET) is the second most important parameter after precipitation in terrestrial water budgets. ET is the sum of water loss through transpiration from plants and evaporation from soils. The objective of this study is to compute ET rates by the SEBAL model using Landsat 5 and Landsat 8 satellite images and to determine the accuracy of the model against ground observations. The ET maps produced by the SEBAL model were compared against the observations collected by the flux tower equipped with the eddy covariance system around Yenicaga Lake in Bolu, Turkey between 2010 and 2014. The results indicated that there was a strong correspondence between the model and ground ET estimates ($R^2=0.83$). The model overestimated the daily total ET values only by 0.04 mm (positive bias). The validation of the model against ground data yielded relatively small errors. The daily mean absolute and root mean square errors were 0.63 mm and 0.71 mm, respectively.

Keywords: Remote sensing, Actual evapotranspiration, SEBAL, Eddy covariance method, Landsat

1. Giriş

İnsan nüfusunun hızla artışına paralel olarak besin ve su ihtiyaçları da artmaktadır. Bu ihtiyaçların karşılanabilmesi için de tarımsal üretiminin artırılması gerekmektedir. Ekilen arazilerin artması ile sulanan tarım arazilerinin alansal artması, yeraltı ve yerüstü su kaynakları üzerinde büyük bir baskı oluşturmaktadır. Ülkemizde, tarım alanlarındaki su kaynaklarının bilinçsiz ve aşırı miktarda tüketilmesi hem yeraltı sularının ve hem yeryüzü üzerindeki baraj ve göllerdeki suların azalmasına yol açmıştır (Ormeci ve Ekercin, 2007). Bununla birlikte, tarımsal kuraklık global tarıma, gıda güvenliğine ve ekonomiye ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu sebeple su kaynaklarının yönetimi ve etkin bir biçimde kullanımı geçmiş zamanlarla karşılaştırıldığında çok önemli hale gelmiştir.

Su yönetiminin en önemli basamaklarından biri su bütçesinin duyarlı bir şekilde hesaplanmasıdır. Su bütçesi, sınırları tanımlanan bir yeryüzü veya yeraltı suyu sisteminde belirli bir zaman aralığı dikkate alınarak sisteme giren ve sistemden çıkan su kütlesi ile depolamada oluşan değişimi gösteren süreklilik denklemini ifade eder. Su miktarındaki kayıpta ve su bütçesi hesaplamasında yağıştan sonraki en önemli parametre hiç kuşkusuz gerçek evapotranspirasyondur (ET). ET, bitkilerden terleme ve toprak yüzeyinden buharlaşma ile kaybolan su miktarının toplamıdır (Monteith, 1965). ET miktarının operasyonel olarak izlenmesi, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımının sağlanması, tarımsal su tüketiminin izlenmesi, yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının yönetimi, su ve enerji bütçelerinin oluşturulması, atmosfer ile yeryüzü arasında enerji değişiminin izlenmesi ve bilinçsiz olarak aşırı sulama yapılan yerlerin belirlenmesi açısından önemlidir. Bu amaçlar ancak, yeryüzü üzerinde periyodik olarak mekânsal gözlem toplayan uzaktan algılama uydularının görüntüleri ile gerçekleştirilebilir.

ET, yersel mikro-meteorolojik cihazlardan veya toprak içindeki su neminin değişiminin direkt olarak ölçülmesiyle elde edilebilir. ET miktarını, yüze gelen güneş enerjisi, toprak nemi, rüzgar, atmosferdeki buhar basıncı açığı gibi etkileyen birçok faktör olduğu için direkt ölçülmesi zordur (Monteith, 1965). Bu yüzden teknolojinin de gelişimiyle birlikte birçok tahmin ve ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Buna rağmen, ülkemizde gerçek ET'yi ölçebilen sistemler çok yaygın değildir (Atasever vd. 2016). Yakın zamana kadar ET, Lizimetre, Eddy Kovaryans (ECOR) metodu ve Enerji Dengesi Bowen Oranı metodu gibi teknikler ile yersel olarak arazide belirlenebildiği gibi Penman-Monteith ve Blaney-Criddle gibi modeller ile noktasal olarak hesaplanabiliyordu (Çaldag, 2019). Örneğin 1980'li yıllarda Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, ülkemizdeki suların planlama ve işletme işlerinde gerekli olan su kaybı miktarını (buharlaşma) Blaney-Criddle yöntemine göre kestirebilmekteydi. (Beyribey vd. 1997)

Yersel ET ölçüm yöntemleri her ne kadar yüksek doğrulukta noktasal ölçümler yapsa da su kaynaklarının izlenmesi için bölgesel ET haritalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Köy, ilçe veya il ölçeğinde ET haritalarının ölçülmesi ancak uzaktan algılama verileri ve görüntü işleme teknikleriyle mümkündür (Yağcı & Santanello, 2018). Yersel veriler ise bu uydu verisi tabanlı haritalarının doğrulanmasında kullanılmaktadır. Bu amaçla, ET hesabı için uzaktan algılama tabanlı birçok yöntem geliştirilmiştir (Li vd., 2009; Mohan vd., 2020). Bu çalışmada, tüm yöntemlerden bahsetmek mümkün olmadığı için ülkemizde daha önce ET hesabı için kullanılan yöntemlerden bahsedilecektir.

Ülkemizde daha önce Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC), Trapezoid model ve NOAA yer yüzeyi modeli gibi modeller ile ET hesabı yapılmıştır (Yılmaz ve Bulut, 2016; Aksu ve Arikan, 2017). SEBAL modeli Gediz Nehri havzasında, Kayseri ilinde ve Adana ilinin Çukurova ilçesinde ET hesabı için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar lizimetre ve bitki katsayısı yöntemi ile elde edilen yersel veriler ile karşılaştırılmıştır (Atasever ve Ozkan, 2018; Atasever vd. 2016; Bastiaanssen, 2000; Sawadogo vd. 2020). METRIC modeli Çakıt havzasında ET hesabı için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ECOR metodu ile elde edilen yersel veriler ile karşılaştırılmıştır (Yanmaz, 2019). Benzer şekilde Trapezoid model, Bolu'nun Yeniçağa ilçesinde ET hesabı için kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ECOR metodu ile elde edilen yersel veriler ile karşılaştırılıp modelin doğruluğu araştırılmıştır (Yağcı, 2023).

Ülkemiz üzerinde SEBAL modeli daha önce çalıştırılmasına rağmen, model çıktıları gerçek ET'yi direk ölçebilen yersel ECOR gözlemleri ile henüz karşılaştırılmamıştır. Bu çalışma kapsamında, SEBAL modeli kullanılarak Türkiye üzerinde Landsat 5 ve Landsat 8 uydu görüntülerinden ET haritaları üretilmesi ve doğruluğunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, üretilen ET haritaları Bolu Yeniçağa bölgesinde 2010-2014 yılları arasında yersel gözlem toplamış bir akı kulesinin verileri ile karşılaştırılıp SEBAL modelinin doğruluğu araştırılmıştır. Böylece, uydu verileri ile çalıştırılan SEBAL modelinin, Türkiye üzerinde tarımsal su tüketiminin belirlenmesi ve su kaynaklarını izleme çalışmalarında kullanılabilirliği ortaya konulacaktır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Arazi İçin Yüzey Enerji Dengesi Algoritması (SEBAL)

SEBAL, uydu görüntülerinin görünür, yakın kızılötesi ve termal (uzun dalga kızılötesi) bantlarını kullanarak iteratif bir şekilde gerçek ET haritası üretebilen, piksel bazlı görüntü işleme algoritmasıdır (Bastiaanssen vd., 1998).

Bu yöntemde toprak veya arazi kullanımıyla ilgili herhangi bir bilgiye gerek yoktur (Atasever vd., 2016). SEBAL tekniğinde yüzey enerji dengesi uydu görüntüsünün her bir pikseline uygulanarak gerçek ET değeri tahmin edilmektedir. Temel enerji dengesi denklemi ise şu şekilde tanımlanır;

$$LE = R_{net} - H - G \quad (1)$$

Bu eşitlikte LE , gizil ısı akısını (W/m^2); R_{net} , net radyasyon (W/m^2); H , hissedilebilir ısı akısını (W/m^2); G ise toprak ısı akısını (W/m^2) ifade etmektedir. SEBAL modelinde, (1)'de geçen tüm bileşenler hesaplanır (Bastiaanssen vd., 1998). Daha sonra LE (W/m^2) aşağıdaki denklem kullanılarak ET'ye ($mm/gün$) dönüştürülebilir.

$$ET_{mm/gün} = 0.0352 \times LE_{W/m^2} \quad (2)$$

Bu eşitlikte LE günlük ortalama gizil ısı akısını ve ET ise günlük toplam topraktan buharlaşan ve bitkilerden terleyen su miktarını ifade eder.

2.1.1. Net Radyasyonun Hesabı

Net radyasyon, yeryüzüne gelen radyasyondan yer yüzeyinden giden radyasyonun çıkarılması ile aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$R_{net} = R_{S\downarrow} - R_{S\uparrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_s) \times R_{L\downarrow} \quad (3)$$

Eşitlikte $R_{S\downarrow}$, gelen kısa dalga radyasyon (W/m^2); $R_{S\uparrow}$, giden kısa dalga radyasyon (W/m^2); $R_{L\downarrow}$, gelen uzun dalga radyasyon (W/m^2); $R_{L\uparrow}$ giden uzun dalga radyasyon (W/m^2); ve ϵ_s normalleştirilmiş fark indeksi kullanılarak hesaplanan yüzey emissivite değeridir (Atasever vd., 2016; Bastiaanssen vd., 1998).

2.1.2. Hissedilebilir Isı Akısı Hesabı

Yer yüzeyi ve hava arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanan ısı transferinin genel adıdır. Hissedilebilir ısı akısının hesabında şu denklem kullanılabilir.

$$H = \rho_a \times C_p \times \left(\frac{dT}{r_{ah}} \right) \quad (4)$$

Eşitlikte, H , hissedilebilir ısı akısı (W/m^2); ρ_a , hava yoğunluğu (kg/m^3); C_p , havanın ısı kapasitesi ($J/kg \times K$); dT , hava ve yer yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı; r_{ah} ise ısı transferine karşı aerodinamik dirençtir.

2.1.3. Toprak Isı Akısı Hesabı

Toprak ısı akısı, toprağın ısınmasına veya soğumasına neden olan enerji miktarı olarak tanımlanır ve şu şekilde hesaplanır;

$$G = R_{net} \times \left(\frac{T_s - 273}{\alpha} \right) \times (0.0032 \times (c1 \times \alpha) + 0.0062 \times (c1 \times \alpha)^2) \times (1 - 0.97 \times NDVI^4) \quad (5)$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (6)$$

Eşitlikte R_{net} , net radyasyon (W/m^2); T_s , yüzey sıcaklığı (Kelvin); $NDVI$, normalleştirilmiş fark bitki indeks değeri Denklem (5); $c1$, düzeltme parametresi (sıklıkla 1.1 kullanılır); α , yüzey albedosudur (Bastiaanssen vd., 1998). Albedo, yüzeylerin ışığı yansıtabilirliğini tanımlayan bir sabittir ve toprak ısı akısının hesaplanması sırasında en önemli parametrelerden biridir (Li vd., 2009).

2.1.4. Gerçek Evapotranspirasyon Hesabı

Net radyasyon, toprak ısı akısı ve hissedilebilir ısı akısı hesaplandıktan sonra gerçek ET aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanır;

$$EF = \frac{LE}{R_{net} - G} \quad (7)$$

$$ET = \frac{86400 \times EF \times (R_{net24} - G)}{\lambda - \rho_w} \quad (8)$$

Eşitlikte EF , buharlaşma fraksiyonu; R_{net24} , günlük ortalama net radyasyon (W/m^2); λ , gizil buharlaşma ısı (J/kg) ve ρ_w , suyun yoğunluğudur (kg/m^3) (Singh vd., 2008).

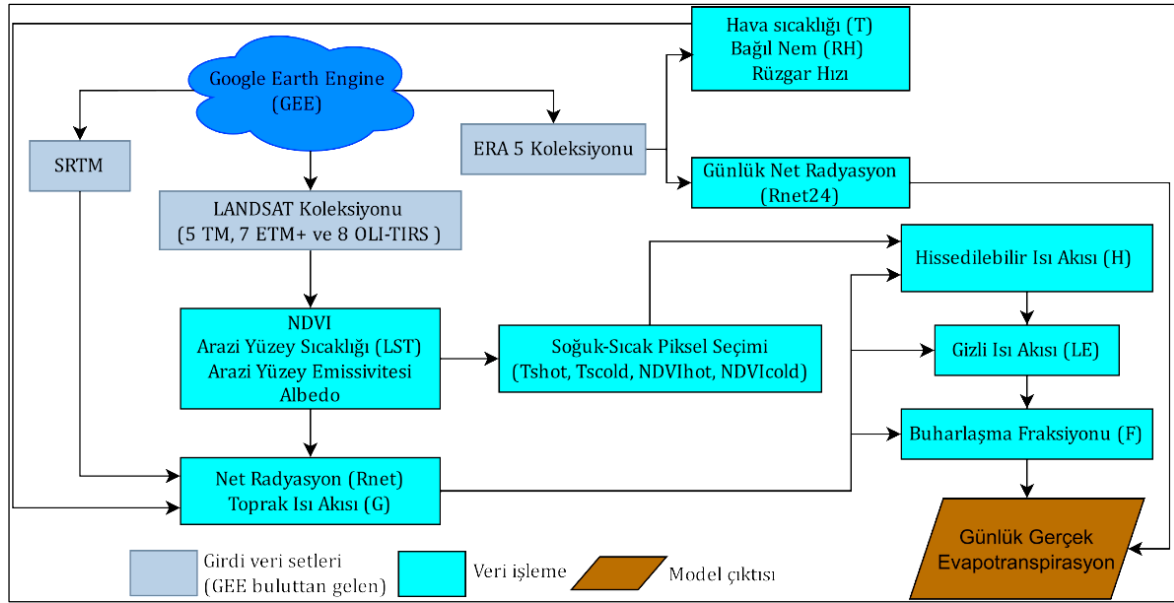
2.2. geeSEBAL

geeSEBAL modeli tüm LANDSAT uydu programları verilerini ve saatlik ERA5-Land meteorolojik verilerini kullanarak SEBAL tekniğinin dünyanın farklı bölgelerinde yüksek performanslı olarak uygulanmasına imkan sağlamaktadır (Laipelt vd. 2021). SEBAL modeli, Laipelt vd. (2021) tarafından hem JavaScript ve hem de Python API (sürüm 3.6 ve üstü) programlama dilinde yazılmış, kodları Google Earth Engine (GEE) platformuna yüklenmiş ve geeSEBAL olarak adlandırılmıştır. GEE platformundaki modelin girdilerini kullanıcıdan alan grafik arayüzlü bir web uygulaması (<https://etbrasil.users.earthengine.app/view/geesebal>) geliştirilmiştir ve kullanıcılar bu uygulamayı kullanarak ilgili Landsat görüntüsünü kutucuk içinden seçerek model çıktısı üretebilmektedir. Ayrıca, modelin kodları, github platformuna (<https://github.com/gee-hydro/geeSEBAL>) yüklenmiştir ve kullanıcılar bu kodları bilgisayarına indirip modeli kendi bilgisayarları üzerinde çalıştırabilmektedir. Bu versiyonda kullanıcılar Landsat görüntülerinin ürün ID'si modelin koduna elle girmesi gerekmektedir.

geeSEBAL aracının *image*, *image collection* ve *time series* adlı 3 tane modülü vardır. Bunlardan *image* modülü, kullanıcı tarafından grafik arayüz kullanılarak belirlenen bir görüntüden gerçek ET hesabı yapan fonksiyonları içermektedir, *ImageCollection modülü* grafik arayüz kullanılmadan verilen bir tarih periyodu içinde bulunan tüm uydu görüntülerinden gerçek ET haritalarını toplu bir şekilde üreten fonksiyonları içermektedir. Son olarak, *timeseries* modülü ise, kullanıcı belirlediği bir noktanın ET değerlerini, üretilen ET haritalarından çekmek için kullanılan fonksiyonları içermektedir.

geeSEBAL'deki tüm iş akışı Şekil 1'de yer almaktadır. Model, üç farklı veriseti kullanarak günlük gerçek ET'yi hesaplamaktadır (Şekil 1). İlk aşamada, Landsat uydu görüntülerinden RGB, NIR ve TIR bantlarını çekerek, NDVI, yüzey sıcaklığı, emissivite ve albedo değişkenlerini üretmektedir. SRTM verisetinden yükseklik verisi çekmektedir. Ayrıca, ERA-5 verisetinden rüzgâr hızı, hava sıcaklığı ve bağıl nem gibi meteorolojik değişkenleri çekilmektedir ve R_{net24} değişkenini hesaplamaktadır. İkinci aşamada yükseklik verisi kullanılarak yüzey sıcaklığını düzeltilmektedir ve NDVI verisi ile düzeltilen yüzey sıcaklığı kullanılarak çalışma alanının sıcak ve soğuk pikselleri bulunmaktadır. Üçüncü aşamada, Landsat girdilerinden R_{net} değişkeni ve G hesaplanmaktadır. En son aşamada, sıcak ve soğuk pikseller ile önceki aşamalarda hesaplanan G ve R_{net24} değişkenleri kullanılarak EF ve ET hesabı yapılmaktadır.

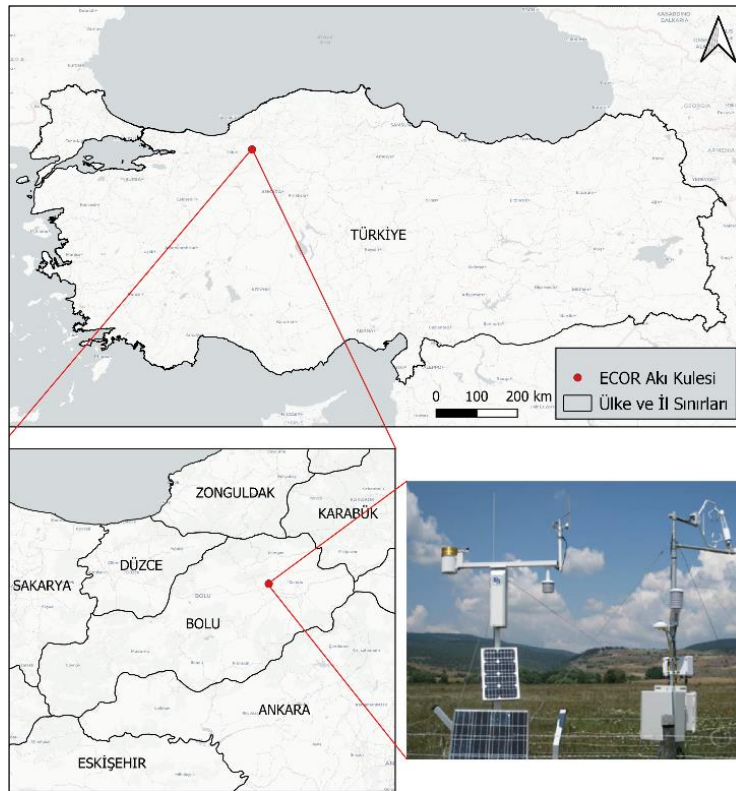
Bu çalışmada, geeSEBAL grafik arayüzlü web uygulaması çok yavaş çalıştığı için modelin Python dilindeki kodu github üzerinden indirilerek bilgisayara yüklenmiştir. Landsat verilerinin ID'leri modele elle girilerek lokal bilgisayar üzerinde çalıştırılmıştır. İlk aşamada, geeSEBAL'in *ImageCollection* modülündeki fonksiyonlar yardımı ile ET haritaları üretilmiştir. İkinci aşamada ise, *timeseries* modülü içerisindeki fonksiyona yersel istasyon noktasının koordinatları girilerek istasyon üzerinde SEBAL ile hesaplanan ET değerleri haritalardan çekilmiştir. Projedeki çalışma alanına ve yersel verinin toplandığı ilgili yıllara ait gerçek ET değerlerinin zaman serileri *timeseries* fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 1. geeSEBAL'deki iş akışı

2.3. Çalışma Alanı

Bu çalışma kapsamında, SEBAL modelinin doğruluğunu belirlemek için Bolu ilinin Yeniçağa ilçesinde 13 Temmuz 2010 ile 19 Şubat 2014 tarihleri arasında ECOR metodu ile yersel veri toplayan akı kulesinin verileri kullanılmıştır. Bu bölge deniz seviyesinden yaklaşık 995 m yüksekte bulunur. Yeniçağa torf yatakları bakımından zengindir ve esas olarak nemli, soğuk ve besin açısından fakir koşullar altında, yeraltı suyunun etkisi olmaksızın oluşan bitkilerin lifli kalıntılarından oluşur. Akı kulesi 2010 yılında 2x2 km²lik bir turbalık üzerine kurulmuştur ve burada faaliyetlerini 2014 yılına kadar sürdürmüştür (Evrendilek, 2015). Şekil 2'de akı kulesinin çalışma alanı içerisindeki konumu yer almaktadır.



Şekil 2. ECOR akı kulesi konum haritası (Yeniçağa Turbalığı, Bolu, Türkiye)

2.4. Yersel Veriler

Bolu Yeniçağa'da kurulan yersel akı istasyonu ECOR tekniği ile ölçüm yapan ekipmanlar içermektedir. Benzer olarak, ülkemizde daha önce aynı yöntem ile Kırklareli (Şaylan vd., 2018) ve Çakıt havzasında (Yanmaz, 2019) yersel veri toplanmıştır. Bu yöntem atmosferik sınır katmanları içindeki dikey türbülanslı akıları ölçmek ve hesaplamak için önemli bir yersel ölçüm tekniğidir. Yöntem, yüksek frekanslı rüzgâr ve atmosferik zaman serilerini, sıcaklık, nem, yağış ve momentumunu analiz eder ve havadaki su buharı ve karbon akılarının değerlerini verir. Meteoroloji ve oşinografi, hidroloji, tarım bilimleri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan Denklem (1)'de verilen enerji eşitliğindeki tüm terimleri direkt ve birbirinde bağımsız olarak hesaplayabilmektedir. Bundan dolayı bu yöntem ile yersel olarak direkt ET verisi toplanabilir (Baldocchi, 2003).

Bolu Yeniçağa'da kurulan akı kulesi, gaz analizör, anemometre, net radyometre, sıcaklık ve nem sensörleri içermektedir. Akı kulesi karbon akısı toplamak amacıyla kurulduğu için toprak plakası içermemektedir. Bundan dolayı akı kulesinde Denklem (1)'de verilen terimlerden H, LE ve Rnet değişkenleri için gözlem toplanmasına rağmen G değişkeni için gözlem toplanmamıştır (Evrendilek, 2015). Ancak, ECOR sisteminde G, H, LE ve Rnet farklı sensörler ile birbirinden bağımsız toplanmaktadır. Bundan dolayı, G toplanmaması doğrulama sonuçlarını olumsuz etkilememektedir.

Doğrulama kapsamında, ilk olarak yersel istasyonda toplanan LE gözlemleri Denklem (2) kullanılarak ET'ye çevrilmiştir. Daha sonra SEBAL modelinden üretilen istasyon üzerindeki pikselde elde edilen ET değerleri ile karşılaştırılmıştır.

2.5. Uydu Görüntüleri

Uydu üzerinden SEBAL modeli kullanılarak ET hesabının yapılabilmesi için görünür (RGB), yakın kızılötesi (NIR) ve termal (termal kızılötesi, TIR) bantlarına sahip uydu görüntüleri kullanılmalıdır. Bu işlem için en uygun uydu görüntüleri LANDSAT uydu programına aittir. Bu program ile toplanılan tüm görüntülere kullanıcılar ücretsiz olarak erişebilmektedir. Çalışma alanında 13 Temmuz 2010 ile 19 Şubat 2014 tarihleri arasında akı kulesinden yersel veriler toplandığından dolayı bu yıllar arasındaki tüm LANDSAT uydu görüntüleri çalışma kapsamında incelenmiştir. Çalışma alanı üzerinde, 13 Temmuz 2010 ile 11 Şubat 2013 tarihleri arasında Landsat 5 uydusunun üzerindeki TM sensörü ile 15, Landsat 7 uydusunun üzerindeki ETM+ sensörü ile 52 ve 11 Şubat 2013 ve 19 Şubat 2014 tarihleri arasında Landsat 8 uydusunu üzerindeki OLI ve TIRS sensörleri ile uydusu ile 18 tane olmak üzere toplamda 85 uydu görüntüsü toplanmıştır. Mayıs 2003'ten sonra Landsat 7 ETM+ uydu misyonuyla toplanan uydu görüntüleri tarama çizgisi hatasından kaynaklanan sistematik boşluklar içermektedir. Bu boşluklar SEBAL modelinde çalışma alanının sıcak ve soğuk piksellerinin bulunmasını etkilediği için çalışma kapsamında kullanılmamıştır.

3. Bulgular

3.1. Modelden Elde Edilen Günlük ET Değerlerinin Yersel Veriler ile Karşılaştırılması

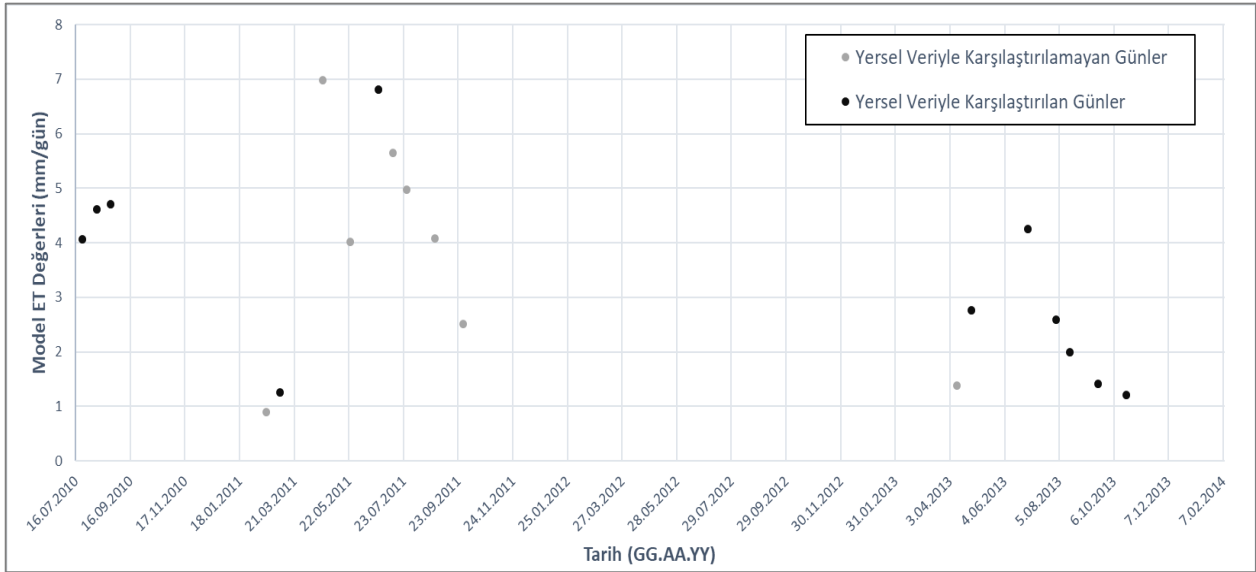
SEBAL modeli, geeSEBAL platformuna ait Python API üzerinde Bolu/Yeniçağa'daki çalışma alanını kapsayan toplam 33 Landsat 5 TM ve Landsat 8 OLI-TIRS uydu görüntüleri için çalıştırılmıştır ve 33 tane SEBAL modeliyle ET haritası üretilmiştir. Bu 33 haritanın 14'ünde bulutlardan dolayı model akı kulesi pikselinde ET hesabı yapılmamıştır. Bundan dolayı, sadece 19 ET haritası yersel veriler ile karşılaştırılacaktır.

SEBAL modeli ile hesaplanan ET değerleri, ECOR tekniği ile toplanan LE gözlemlerinden Denklem (2) kullanılarak hesaplanan ET değerleri ile karşılaştırıldığından ilgili günlerde yersel verinin de bulunması gerekmektedir. Yağmurlu günlerde akı kulesi üzerindeki ET değerini toplayan gaz sensörü ıslandığı için yersel veriler doğrulamada kullanılmamaktadır (Sun vd., 2008). Ayrıca, yersel verilerde boşluklar bulunduğu için gün ortalamaları hesaplanamamaktadır. Bunlardan dolayı 19 günün 8'inde karşılaştırma yapılamamıştır. Özetle, akı kulesi üzerinde hem yersel verinin eksiksiz toplandığı hem de SEBAL modelinin ET değeri ürettiği 11 tane görüntü bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında yersel veriyle karşılaştırılan uydu görüntülerin toplanma tarihi, ürün ID'si ve bulutluluk oranları gibi bilgileri Tablo 1'de verilmiştir.

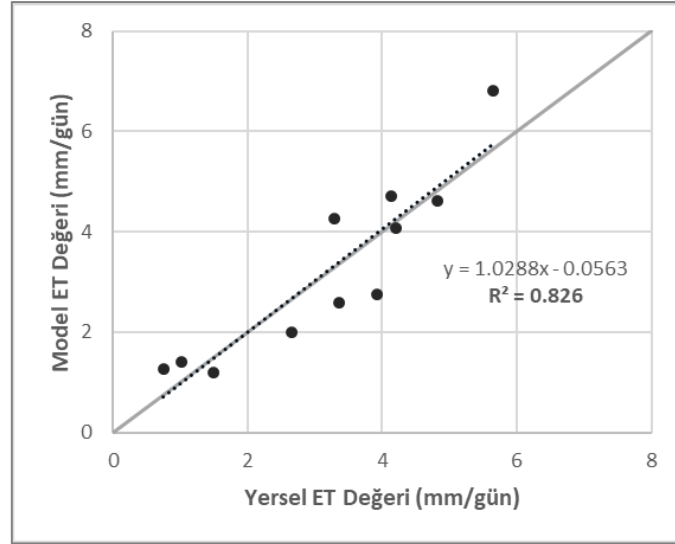
Tablo 1. Doğulamada kullanılan Landsat 5 ve 8 uydu görüntülerinin toplanma tarihi, ürün ID'si ve bulutluluk oranları

Tarih (gg.aa.yy)	Landsat Ürün ID	Bulutluluk Oranı (%)
24.07.2010	LT51780322010205MOR00	8.00
09.08.2010	LT51780322010221MOR00	8.00
25.08.2010	LT51780322010237MOR00	0.00
05.03.2011	LT51780322011064MTI00	39.00
25.06.2011	LT51780322011176MOR01	2.00
27.04.2013	LC81780322013117LGN02	0.16
30.06.2013	LC81780322013181LGN01	29.54
01.08.2013	LC81780322013213LGN01	54.09
17.08.2013	LC81780322013229LGN01	15.46
18.09.2013	LC81780322013261LGN01	31.42
20.10.2013	LC81780322013293LGN01	5.33

SEBAL modeli ile akı kulesi pikselinde elde edilen ET değerleri Şekil 3'te verilmiştir. Koyu siyah renkte verilen ET değerleri yersel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada belirleme katsayısı (R^2), biyas (B), ortalama mutlak hata (MAE), karesel ortalama hata (RMSE) gibi istatistiksel ölçütler kullanılmıştır ve modelin çalışma alanındaki performansı belirlenmiştir.



Şekil 3. SEBAL modeli ile akı kulesi üzerinde elde edilen ET değerlerinin zamansal değişimi (koyu siyahla gösterilen ET değerlerinde yersel veriler ile doğrulama yapılmıştır)



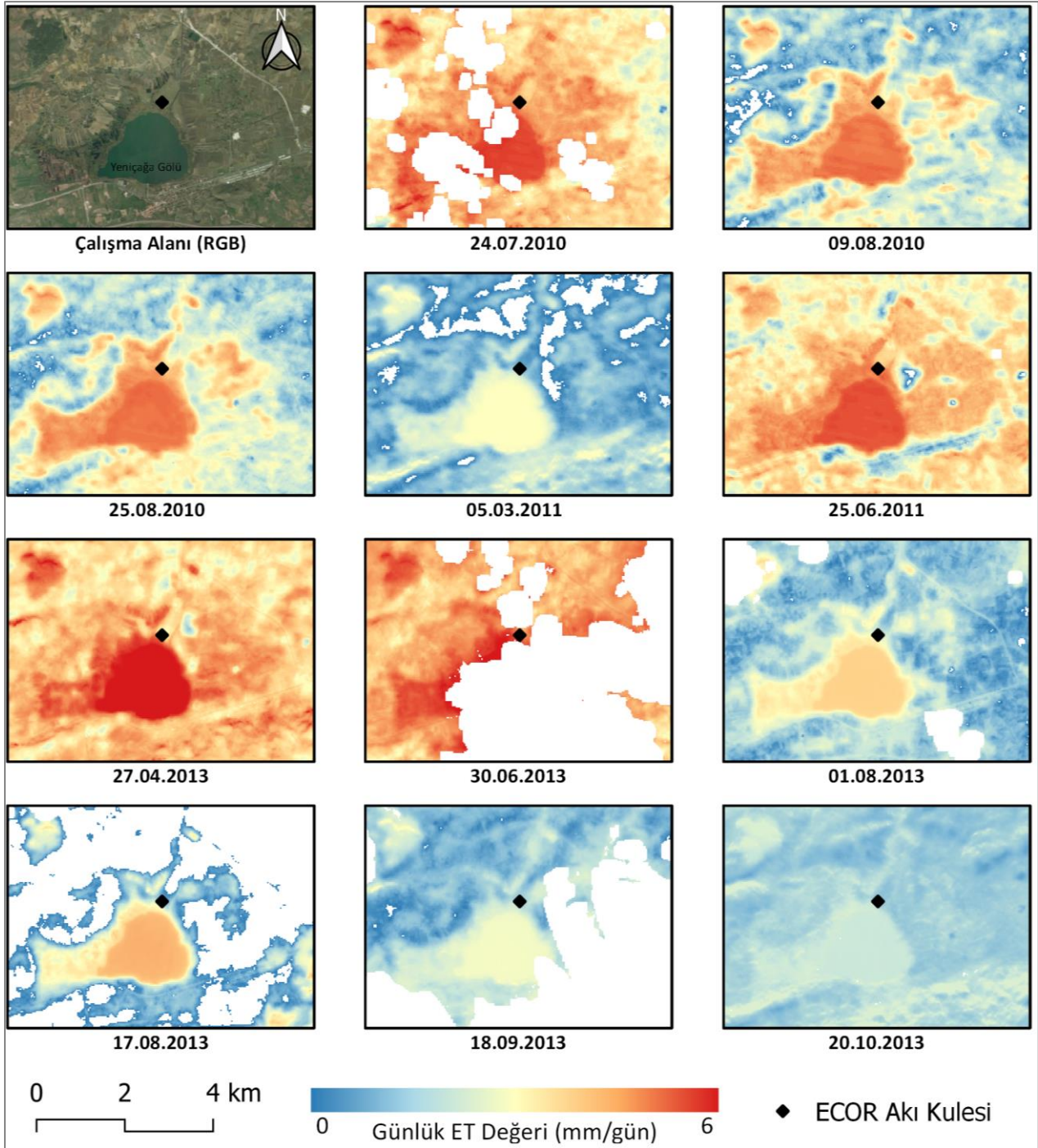
Şekil 4. Modelden elde edilen ve yersel verilerden hesaplanan günlük ET (mm/gün) değerlerinin karşılaştırılması

Tablo 2. Modellenen ve yersel verilerden hesaplanan günlük ET (mm/gün) değerlerinin karşılaştırılması sonucu elde edilen hata ölçütü değerleri

	ET (mm/gün)
n	11
B	0.04
MAE	0.63
RMSE	0.71
R²	0.83

Modelden elde edilen ve yersel verilerden hesaplanan günlük ET (mm/gün) değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4'te verilmiştir. Ayrıca yersel verilere göre hesaplanan hata ölçütü değerleri Tablo 2'de yer almaktadır. Karşılaştırma sonuçlarına göre SEBAL modelinden elde edilen gerçek ET değerleri ile yersel verilerden hesaplanan ET değerleri arasında güçlü bir ilişki görülmektedir ($R^2=0.83$). Model, yersel veriye göre günlük toplam ET değerlerini sadece 0.04 mm fazla (pozitif bias) hesaplamıştır. Model ile yersel verilerin karşılaştırılması sonucunda MAE ve RMSE sırasıyla günlük 0.63 mm ve 0.71 mm hata ile hesaplamıştır (Tablo 2).

Tablo 1'de verilen uydu görüntülerinden elde edilen ve yersel veriyle karşılaştırılan akı kulesine yakınlaştırılan gerçek ET haritaları Şekil 5'te verilmiştir. Sol üstteki ilk harita çalışma alanının doğal renkli (RGB) görüntüsüdür. Diğer haritalar ET miktarının çalışma alanı üzerindeki mekânsal dağılımını göstermektedir. Beklendiği gibi, tüm tarihlerde en yüksek ET değerleri Yeniçağa gölünün üzerinde görülmüştür. Yeniçağa gölünün etrafındaki tarım alanları ve gölün kuzeybatısında yer alan ormanlık alanda ET değerleri diğer alanlara göre daha yüksek ET değerleri göstermektedir. Ormanlık alan ile tarım alanları, 9 Ağustos 2010 ve 25 Ağustos 2010 tarihli ET görüntülerinde belirgin bir şekilde diğer arazi örtüsü sınıflarından çok rahat bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Bu tarihlerde, ormanlık alan ile etrafındaki arazi örtüsü arasında yüksek ET farkı bulunmaktadır. Aynı şekilde, göl etrafındaki tarım alanları diğer alanlar arasında da yüksek ET farkı bulunmaktadır. Diğer yandan, ilkbaharda (5 Mart 2010) ve sonbaharda (20 Ekim 2010) elde edilen ET haritalarda, göl, ormanlık alan ve tarım alanları ile diğer alanlar arasında çok belirgin ET kontrastı görülmemektedir. Haritalarda görülen ET değerleri beklendiği gibi tüm bölgeler için soğuk aylara göre sıcak aylarda daha yüksek değerler almaktadır. Bu durum Şekil 3'teki akı kulesi ET zaman serisinde de görülmektedir. Şekil 5'te verilen haritalar yer yer boşluklar içermektedir. Örneğin, 30 Haziran 2013 tarihli ET haritasının neredeyse yarısında ET değerleri hesaplanamamıştır. Bunun nedeni bulut ve bulut gölgesinden dolayı yeryüzü üzerinde veri toplanamadığı için bu bölgeler ET modellerinin çalışması sırasında maskelenmektedir. Bulutlu bölgelerin hesaplardan çıkarılması ET modellerinin en önemli aşamalarından biridir. Eğer bulutlu bölgeler modelden çıkarılmazsa, ET modelleri yanlışlıkla bulutlu bölgeleri soğuk piksel olarak seçmektedir ve ET haritasındaki tüm ET değerlerinin hatalı hesaplanmasına yol açmaktadır. Özetle, bulutlu bölgeler üzerinde ET hesabı yapılamadığı için bu bölgeler ET haritalarında boş olarak görülmektedir.



Şekil 5. Çalışma kapsamında üretilen gerçek ET haritaları ve çalışma alanının RGB görüntüsü (görüntü tarihleri haritaların altına yazılmıştır. Beyaz alanlarda bulutlardan dolayı ET hesabı yapılamamıştır)

4. Sonuç

Bu çalışmada, uydu görüntüleri ve SEBAL modeli kullanılarak yüksek doğruluklu mekânsal ET haritalarının üretilip üretilmeyeceği araştırılmıştır. SEBAL modeli ile üretilen ET haritaları, Bolu Yeniçağa gölünün kuzey tarafında kurulan yersel akı kulesinde toplanan gözlemler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, uydudan hesaplanan ET değerleri ile yersel günlük ET değerleri arasında yüksek ilişki ve düşük hata değerleri bulunmuştur. Bundan dolayı SEBAL modelini uydu görüntüleri kullanarak çalıştırarak yüksek doğruluklu ET haritaları üretmek mümkündür. Bu yöntem ile yeni atılan uydu misyonlarından elde edilen (ECOSTRESS ve Landsat 9) görüntüler ile çalıştırılması durumunda daha sıklık ile ET haritaları üretilme kabiliyetine sahiptir.

SEBAL, Trapezoid ve METRIC gibi ET modelleri sadece termal görüntü toplayan uydu misyonları ile çalışabildiği için zamansal olarak düşük çözünürlükte ET haritaları üretebilmektedir. Ayrıca, bulutlardan dolayı üretilen sonuçların sıklığı daha da düşmektedir. Yersel akı kulesi toplamda 1317 gün Bolu Yeniçağa'da kurulu kalmış ve gözlem toplamıştır. Çalışma alanı üzerinde Landsat 5, 7 ve 8 uydusu ile toplanan toplam 85 tane görüntü bulunmuştur. Ancak, bunlardan 52'si Landsat 7 ile toplandığı için modelde kullanılamamıştır. Geriye kalan 33 görüntüden ET haritası üretilmiştir. İstasyon üzerindeki bulutlar ve yersel verideki boşluklardan dolayı 11 günde doğrulama yapılmıştır. Ayrıca, bulutlar nedeniyle üretilen 33 haritada büyük boşluklar bulunmaktadır. Özetle, sadece RGB, NIR ve TIR bölgelerinde gözlem toplayan uydu görüntüleri ile çalışması, yoğun bulutlu olan günlerde modelin çalışmaması ve bulutlu olan bölgeler için ET değeri hesaplayamaması gibi özellikleri modelin dezavantajları arasında bulunmaktadır. Yersel istasyonlarda toplanan gözlemleri kullanmadan sadece uydu tabanlı girdiler ile yüksek doğruluklu ET hesabı yapması modelin en önemli avantajıdır.

ET konusunda ileri araştırma olarak, bulutlardan dolayı görüntülerde bulunan boşlukların doldurulması ile Landsat 7 görüntülerindeki tarama çizgisi hatasından kaynaklanan boşlukların doldurulması önem arz etmektedir. Böylelikle, ET haritalarının sıklığı daha da arttırılarak tarımsal su tüketimi çalışmalarında dönemsel analizlere imkân sağlamak mümkün olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 3501 - Kariyer Geliştirme Programı (Proje No: 120Y050) ve TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Proje Adı: Gerçek Evapotranspirasyonun Uydu Görüntüleri Kullanarak SEBAL Modeli ile Hesaplanması) kapsamında desteklenmiştir. Modelin doğrulanmasında kullanılan Bolu Yeniçağa'da kurulan akı kulesinde toplanan yersel gözlemleri paylaştığı için Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Çevre Mühendisliği Öğretim Üyesi Prof. Dr. Fatih Evrendilek'e teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Atasever, Ü. H., Çobaner, M., Çetin, M., Özkan, C., & İnan, H. İ. (2016). SEBAL tekniği ve Landsat 8 uydu görüntüsü kullanılarak gerçek evapotranspirasyonun haritalanması: Kayseri örneği. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 237-245.
- Atasever, U. H., & Ozkan, C. (2018). A New SEBAL Approach Modified with Backtracking Search Algorithm for Actual Evapotranspiration Mapping and On-Site Application. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(8), 1213-1222.
- Aksu, H., & Arıkan, A. (2017). Satellite-based estimation of actual evapotranspiration in the Büyük Menderes Basin, Turkey. *Hydrology Research*, 48(2), 559-570.
- Baldocchi, D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biology*, 9(4), 479-492.
- Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229(1), 87-100.
- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., & Feddes, R. A. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213(1998), 198-212.
- Beyribey, M., Çakmak, B., Sönmez, F. K., & Oğuz, M. (1997). Sulama Şebekelerinde Blaney Criddle ve Penman o Monteith Yöntemlerine Göre Sulama Suyu ihtiyacının Karşılaştırılması. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 3(1), 74-78.
- Çaldag, B. (2019). Bitki Yüzeyi Üzerinde Enerji Dengesi Bileşenlerinin Belirli Fenolojik Aşamalarda Analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21(61), 97-105.
- Evrendilek, F. (2015). Assessing CO₂ sink/source strength of a degraded temperate peatland: Atmospheric and hydrological drivers and responses to extreme events. *Ecohydrology*, 8(8), 1429-1445.
- Laipelt, L., Henrique Bloedow Kayser, R., Santos Fleischmann, A., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178(2021), 81-96.
- Li, Z.-L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., & Zhang, X. (2009). A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors*, 9(5), 3801-3853.
- Mohan, M. M. P., Kanchirapuzha, R., & Varma, M. R. R. (2020). Review of approaches for the estimation of sensible heat flux in remote sensing-based evapotranspiration models. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(4), 041501. doi: 10.1117/1.JRS.14.041501
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Ormeci, C., & Ekercin, S. (2007). An assessment of water reserve changes in Salt Lake, Turkey, through multi-temporal Landsat imagery and real-time ground surveys. *Hydrological Processes*, 21(11), 1424-1435.

- Sawadogo, A., Tim, H., Gündoğdu, K. S., Demir, A. O., Ünlü, M., & Zwart, S. J. (2020). Comparative analysis of the pysebal model and lysimeter for estimating actual evapotranspiration of soybean crop in Adana, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 5(2), 60-65.
- Singh, R. K., Irmak, A., Irmak, S., & Martin, D. L. (2008). Application of SEBAL Model for Mapping Evapotranspiration and Estimating Surface Energy Fluxes in South-Central Nebraska. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(3), 273-285.
- Sun, G., Noormets, A., Chen, J., & McNulty, S. G. (2008). Evapotranspiration estimates from eddy covariance towers and hydrologic modeling in managed forests in Northern Wisconsin, USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(2), 257-267.
- Şaylan, L., Özkoca, Y., Çaldağ, B., & Bakanoğulları, F. (2018). Comparison of Micrometeorological Methods used for the Determination of Actual Evapotranspiration. *International Journal of Crop Science and Technology*, 4(1), 13-22.
- Yagci, A., & Santanello, J. (2018). Estimating Evapotranspiration From Satellite Using Easily Obtainable Variables: A Case Study Over the Southern Great Plains, USA. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(1), 12-23.
- Yağcı, A. L. (2023) Bolu Yeniçağa'da evapotranspirasyonun Landsat uydu görüntüleri ve trapezoid model ile izlenmesi. *Geomatik*, 8(1), 18-26.
- Yanmaz, D. D. (2019). *Estimating evapotranspiration by METRIC model over Çakit basin* (Master thesis). Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- Yılmaz, M. T., & Bulut, B. (2016). Türkiye'deki 2000-2015 yılları arasındaki buharlaşma ve terlemenin NOAA hidrolojik modeli ile incelenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(2), 225-235.

Landsat ETM+ Uydu Görüntüleri ile Metal Kaynaklı Bitki Stresinin Araştırılması

Investigating Metal-Induced Vegetation Stress with Landsat ETM+ Satellite Images

Feride Seçil Yıldırım^{1*}, Esra Tunç Görmüş¹

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61100, Trabzon/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Feride Seçil Yıldırım
scllydr01@gmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1126649

Yayın süreci

Geliş tarihi: 17.06.2022

Kabul tarihi: 01.09.2022

Basım tarihi: 18.09.2022

Özet

Uzaktan algılama teknolojisi günümüzde birçok alanda kullanılmakta, zor şartlar altındaki konumsal analiz işlemlerini kolaylaştırmaktadır. Bu teknoloji; hastalıklı bitkilerin tespiti, arazi sınıflandırması, değişim analizi, afet ve orman yönetimi ve maden tespiti gibi birçok alanda analiz imkânı sunmaktadır. Özellikle maden tespiti, ülkelerin ekonomisi için büyük önem arz etmektedir. Yersel ölçüm teknikleriyle bitki kaplı arazilerde, maden tespiti yapmak uğraştırıcı bir durumken, uydu görüntüleriyle daha kısa sürede maden sahaları tespit edilebilmektedir. Bitkiler ağır metallerle maruz kaldıklarında klorofil miktarlarında, dolayısıyla yansıma değerlerinde anomaliler açığa çıkmaktadır. Diğer bir deyişle, toprak altındaki madenler bitkilerde strese neden olup, bitki anomalilerine yol açmaktadır. Bitki stresi tespitinde anomali miktarlarındaki değişimler baz alınmıştır. Bitkilerin maruz kaldığı stres ile anomali miktarı doğru orantılıdır. Bu çalışmada, Çukuralan (İzmir) ve Kışladağ (Uşak) bölgelerinde toprak altında altın madeni bulunan alanlara ait Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) uydu görüntülerini kullanarak, bitki örtüsünün maruz kaldığı stres VIGS indeksiyle bulunmaya çalışılmıştır. İlave olarak test alanı için bitki örtüsüyle kaplı iki bölgenin madenli ve madensiz olmak üzere toplamda dört farklı arazi türünde literatürde mevcut diğer bitki indeksleriyle (NDVI, GNDVI, BNDVI) karşılaştırması yapılmıştır. Değerlendirme sonuçlarına göre, madenli alanlardaki VIGS ve NDVI indekslerinin, madensiz alanlara ait değerleri arasındaki farkın yüksek olduğu görülmüş, bundan dolayı ağaçlık alanlara ait anomali miktarı tespitinde kullanılabilirliği önerilmiştir.

Anahtar kelimeler: VIGS indeksi, Maden tespiti, Bitki anomalileri, Bitki stresi

Abstract

Remote sensing technology is used in many areas today, facilitating spatial analysis operations under difficult conditions. This technology offers solutions in different fields such as forest degradation, land classification, change analysis and mine detection. In particular, mine detection is of great importance for the economies of countries. Detecting mines with terrestrial measurement techniques in vegetated areas is a challenging situation, but mine sites can be easily detected, by using satellite images in a shorter time. When plants are exposed to heavy metals, anomalies occur and they cause reduction in the amount of chlorophyll. This can be observed as decrease in the reflectance values. In this study, it is aimed to detect the stress of the plants due to heavy metal by measuring the amount of the change in the reflectance values of plants in mining area and non-mining area. In this context, VIGS index is exploited on Landsat ETM+ satellite images belong to Çukuralan/Izmir and Kışladağ/Usak regions for both gold mine and non-gold mine areas. Other vegetation indices (NDVI, GNDVI, BNDVI) were also computed on these sites when they were covered with vegetation. According to the evaluation results, it was seen that the difference between the values of the VIGS and NDVI indexes in the mine and not mine areas were higher, and therefore it was suggested that they could be used to determine the amount of anomaly in the wooded areas.

Keywords: VIGS index, Mineral detection, Plant anomalies, Plant stress

1. Giriş

Madencilik, tarih boyunca medeniyetleri şekillendiren ve ülkelerin jeopolitik konumlarını etkileyen en temel sektörlerden biri olmuştur. Günümüzde madencilik faaliyetleri önemini giderek arttırmakta ve devletlerin sahip oldukları maden potansiyeli, politikalarının şekillenmesinde kritik rol oynamaktadır. Madencilğin günümüzdeki stratejik öneminin yanı sıra yaşanabilir ve sürdürülebilir bir dünya için çevre etkisi de göz ardı edilmemelidir. Maden kaynaklarını kullanmayan bir ülkenin kalkınması mümkün değildir. Yeryüzündeki mevcut maden sahalarının ağaçlık bölgelerde bulunmasından dolayı maden tespiti yapmak zaman alıcı ve maliyet gerektiren bir iştir. Maden arama işlerini kolaylaştırmak için arazi çalışmasından önce uydu görüntülerinden ön bilgi almak mümkündür. Ağaçlık bölgelerde indekslerin kullanımıyla birçok alanda kolaylık ve profesyonellik sağlandığı gibi, maden tespitinde de bitki indeksleri kullanılabilir (Jackson ve Huete, 1991; Bannari vd., 1995). Yersel ölçüm teknikleri ile bitki kaplı arazilerde, maden tespiti yapmak zahmetli bir durum iken; uydu görüntüleri ile birlikte daha kısa sürede maden sahaları tespit edilebilmektedir (Baran, 2021). Uydu görüntülerinden maden sahalarının araştırılması ve tespiti çevre dostu bir yöntem olmasıyla birlikte geliştirilmeye açık bir yöntemdir.

Hede vd. (2017) zengin mineralli ve kalın bitki örtüsüyle kaplı Kuzey Japonya'nın Hokuroku ilçesinde bitkilerin stres anomalilerindeki değişimi tespit etmek amacıyla VIGS indeksi kullanılmıştır. Hede vd. (2015) başka bir çalışmada ise Sumatra tropikal yağmur ormanlarında VIGS ve NDVI indekslerini kullanılmıştır. Bu çalışmalardan esinlenerek VIGS indeksi Türkiye'de altın madeninin olduğu alanlardaki bitki stres anomalilerindeki değişimleri incelenmiş ve diğer bitki indeksleri ile karşılaştırılmıştır.

İlave olarak literatürde Zhang vd. (2019) tarafından yapılan mısır bitkileri üzerindeki ağır metal stresinin tespiti için yeni bir bitki örtüsü indeksi olan Vegetation Heavy Metal Pollution Index (VHMPI) uygulaması ve Fu vd. (2020) tarafından yapılan mısır bitkisi üzerinde hangi metalin strese sebep olduğunu anlamak için kullanılan ve spektrumların karakteristik aralıklarını elde etmek konusunda yararlanılan Ratio Difference of Autocorrelation (RDA) yöntemi ile sinyallerin güç spektral yoğunluğu (PSD) bilgilerini içeren özellik çıkarma yönteminin yanında ham verilere ampirik mod ayrıştırması Empirical Mode Decomposition-Power Apectral Density (EMD) uygulanarak farklı frekans seviyelerindeki sinyallerin elde edildiği yöntemler de mevcuttur.

Bir başka çalışmada ise Carranza ve Hale (2001) tarafından yapılan çalışmada, Güneydoğu Asya'daki Catanduanes adasında belirlenen test bölgesinde NDVI indeksi kullanılarak metal kaynaklı bitki stresi incelenmiştir. Bitki örtüsünün NDVI değerleri; altın (Au), arsenik (As), bakır (Cu), demir (Fe), kükürt (S) ve çinko (Zn) mineral değerleriyle ters orantılıdır. Analiz sonuçları, bitki örtüsündeki jeokimyasal stresin Landsat TM gibi geniş bant spektral tarayıcı ile tespit edilebileceğini göstermiştir.

VIGS indeks bitkilerin anomali miktarlarının tespiti üzerine çalışan bir indekstir. Bitkiler ağır metallerle maruz kaldıklarında klorofil miktarlarında azalma ve dolayısıyla anomali miktarlarında artma meydana gelmektedir. Anomali miktarlarına göre yer altında maden olup olmadığı tespit edilebilmektedir. Metal kaynaklı bitki anomalisi NIR ve SWIR bantlarında yansıma değişikliğine sebep olmaktadır.

Bu çalışmada metal kaynaklı bitki anomalisine duyarlı indeksleri kullanarak madenli ve madensiz alanlarda bulunan ağaçlık bölgelerin seçilen indekslere verdikleri tepkilerin araştırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca kullanılan indekslerin maden tespitinde güvenilirlik seviyelerini araştırmak amacıyla indeks sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

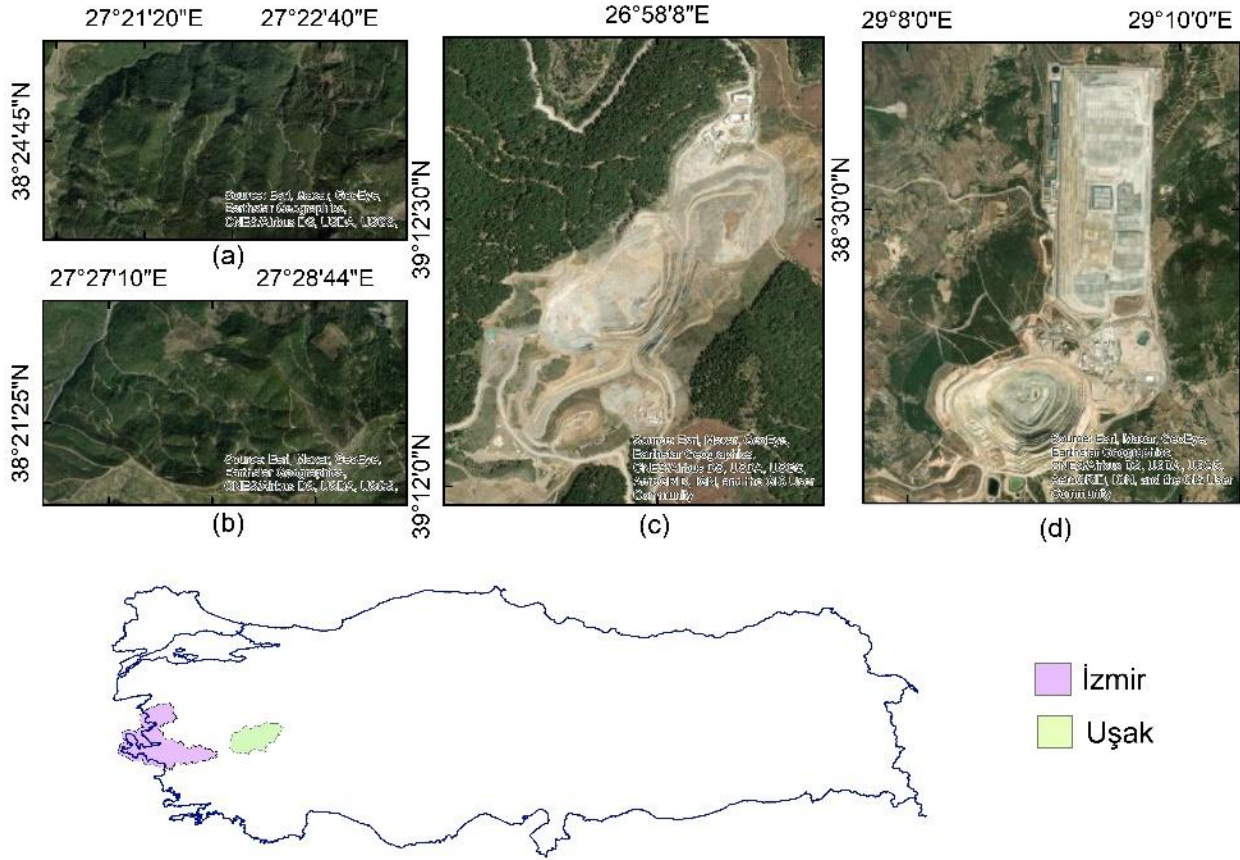
2. Materyal ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Madenli ve madensiz alanlarda bulunan bitkilerin indeksler yardımıyla spektral yansımalarını karşılaştırmak için çalışma alanı olarak Şekil 1'de gösterilen İzmir Çukuralan Altın Madeni (c) ve Uşak Kışladağ Altın Madeni (d) seçilmiştir. Uşak Kışladağ Altın Madeninde maden kazıları 2006 senesinde başlamış olup, 13 ton altın çıkarılmıştır (TÜPRAG, 2022). İzmir Çukuralan Altın Madeninde ise kazı çalışmaları 2009 senesinde başlamış olup, maden alanında 31 ton (1 milyon ons) altın rezervi bulunmaktadır (AMD, 2022).

VIGS indeks ve diğer bitki indekslerinin uygulanabilmesi açısından Çukuralan ve Kışladağ altın madenlerinde henüz kazıların başlamadığı, maden sahasının bitkilerle kaplı olduğu tarihlere ait görüntüler seçilmiştir. Madensiz alanlar ise maden sahalarıyla aynı bitki örtüsüne sahip yine Şekil 1 (a) ve (b)'deki gibi rastgele 2 alan olarak seçilmiştir. İzmir Çukuralan Altın Madeni ve Uşak Kışladağ Altın Madeninin çalışma alanı olarak seçilmesindeki temel neden henüz maden kazılarına başlamadan önceki dönemlerde bu alanların bitki indekslerinin uygulanabileceği şekilde kalın bitki örtüsüyle kaplı alanlar olmasıdır.

İlave olarak anomali miktarlarındaki değişimi en doğru şekilde yorumlamak için sonbahar ve yaz aylarına ait görüntüler tercih edilmiştir. İndeks uygulamasında yer doğruluğunun sağlanması açısından maden sahalarında henüz maden kazılarının başlamadığı, yeşilliklerle kaplı olduğu tarihlerdeki uydu görüntüleri kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı (a) ve (b) İzmir ilinde rastgele seçilen madensiz yeşil alanlar, (c) İzmir Çukuralan altın madeni sahasının maden kazılarının başladıktan sonraki görüntüsü ve (d) Uşak Kışladağ altın madeni sahasının maden kazılarının başladıktan sonraki görüntüsü.

2.2. Veri Seti

Veri alınabilecek tarihleri seçmek için İzmir Çukuralan altın madeni kuruluş tarihi (2009) ve Uşak Kışladağ altın madeni kuruluş tarihi (2006) bilgileri kullanılmıştır. Google Earth Pro zaman gezgininden ilgili bölgelerde henüz kazı çalışmalarının başlamadığı ve bitki örtüsüyle kaplı olduğu tarihler tespit edilmiştir. Bu çalışma için en uygun mevsimler anomali miktarlarındaki değişimi yorumlamak açısından sonbahar ve yaz mevsimleridir. Dolayısı ile İzmir Çukuralan altın madenine ait Kasım 2001, Eylül 2003, Temmuz 2002, Ağustos 2003 ve Uşak Kışladağ altın madenine ait, Kasım 1999, Eylül 2000, Ağustos 1999, Temmuz 2000 tarihlerine ait Landsat ETM+ uydu verileri USGS sitesi üzerinden indirilmiştir (USGS, 2022).

2.3. Metodoloji

Bu çalışmada Landsat ETM+ görüntülerinde bitki örtüsü ile kaplı alanlarda metal kaynaklı bitki stresini bulabilmek için farklı bitki indeksleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda yeşillik ve kısa dalga kızılötesi bölgelerini değerlendiren (VIGS) indeksi, Normalleştirilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), Yeşil Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (GNDVI) ve Mavi Normalleştirilmiş Bitki Örtüsü İndeksi (BNDVI) kullanılmıştır.

USGS sitesinden indirilen maden sahalarına ve madensiz alanlara ait Landsat ETM+ görüntülerine QGIS uygulaması üzerinden radyometrik ve atmosferik düzeltmeler uygulanmıştır. Ardından QGIS uygulamasında uydu görüntülerinden çalışma alanları (ROI) kesilerek çıkarılmıştır. Kırpılmış ve reflektans değerlerine sahip görüntülerin yakın kızılötesi (NIR), kısa dalga kızıl ötesi (SWIR1-SWIR2), görünür yeşil ve görünür kırmızı bantları MATLAB yazılımında açılıp VIGS indeksi uygulanmıştır.

VIGS değerleri, Tablo 1’de gösterilen bant 2, 3, 4, 5 ve 7’deki yansımaların bir kombinasyonu ve $w_1=1$, $w_2=0.5$, $w_3=1.5$, $w_4=1.5$ ağırlıklandırma katsayıları ile oluşturulan denklem (1) kullanılarak her görüntü için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ağırlıklandırma katsayıları, ağır metallerle maruz kalmış, stres altındaki bitkilerin hangi dalga boylarında en fazla yansıma veya soğurma yaptıkları ile ilgilidir. Ağır metal stresi bitkilerde fotosentetik hız ve yaprakların stoma iletkenliği gibi bir dizi fizyolojik işlevi etkileyebilir (Jin vd., 2017). Ağır metaller kloroplastın merkez atomu olarak magnezyumun yerini alır ve klorofildeki enzimlerin aktivitesini etkiler, bu da bitkilerin fotosentezini zayıflatarak bitki stresine sebep olur (Ren vd., 2008). Metal kaynaklı bitki anomalisi NIR ve SWIR bantlarında yansıma değişikliğine sebep olmaktadır. Bu nedenle VIGS denkleminde SWIR ve NIR bantlarından oluşan ifadenin ağırlıklandırma katsayıları büyük değer almıştır (Hede vd., 2017).

Tablo 1. Landsat ETM+ görüntüsünde indeksler için kullanılan bantlar.

Bant-1	Mavi(B)
Bant-2	Yeşil (G)
Bant-3	Kırmızı (R)
Bant-4	Yakın kızıl ötesi (NIR)
Bant-5	Kısa dalga kızıl ötesi (SWIR1)
Bant-7	Kısa dalga kızıl ötesi (SWIR2)

$$VIGS = w_1 * \left(\frac{G-R}{G+R} \right) + w_2 * \left(\frac{NIR-R}{NIR+R} \right) + w_3 * \left(\frac{NIR-SWIR1}{NIR+SWIR1} \right) + w_4 * \left(\frac{NIR-SWIR2}{NIR+SWIR2} \right) \quad (1)$$

Metal kaynaklı bitki stresi NIR ve SWIR yansımalarında ortaya çıkmıştır. Stresin neden olduğu bir yansıma değişikliğini vurgulamak ve anomalilerin modelini netleştirmek için, VIGS veri setinden piksel başına hesaplanan ortalamanın (m) standart sapmaya (σ) oranı kullanılmıştır. Stresli bitkilerin yansımalarındaki mevsimsel (sonbahar ve yaz) değişimin küçük olması ve büyük oranda ürün vermesi beklenmiştir.

İlave olarak Şekil 2’de gösterilen iş akış şemasındaki sıraya uygun olarak çalışmada kullanılan diğer bitki indeksleri (NDVI, GNDVI, BNDVI) denklem (2), denklem (3) ve denklem (4) ile hesaplandıktan sonra ortalama/standart sapma oranları Şekil 2’de gösterilen iş akış şemasını takiben hesaplanmıştır.

NDVI: Yeşil yapraklı bitkiler, fotosentez yaparken enerji kaynağı olarak kullandıkları solar radyasyon dediğimiz güneş ışıklarını emerler. Bu nedenle, canlı bitkiler, yakın kızılötesi kameralarda daha parlak görünür. Bitki yapraklarında bulunan klorofil, fotosentezde kullanılmak üzere görünebilir ışığı (0,4-0,7 μm) güçlü bir şekilde emer. Yaprakların özel hücre yapısı ise yakın kızılötesi (0,7 ila 1,1 μm) ışığı güçlü bir şekilde yansıtır. Sonuç olarak bir bitki ne kadar sağlıklıysa, ışık dalga boyları o kadar fazla etkilenir (Lee vd., 2021; Jiang vd., 2022).

GNDVI: Yeşil normalleştirilmiş bitki örtüsü indeksi NDVI’ya benzer, ancak kırmızı yerine yeşil spektrumu kullanır (Buschmann ve Nagel, 1993).

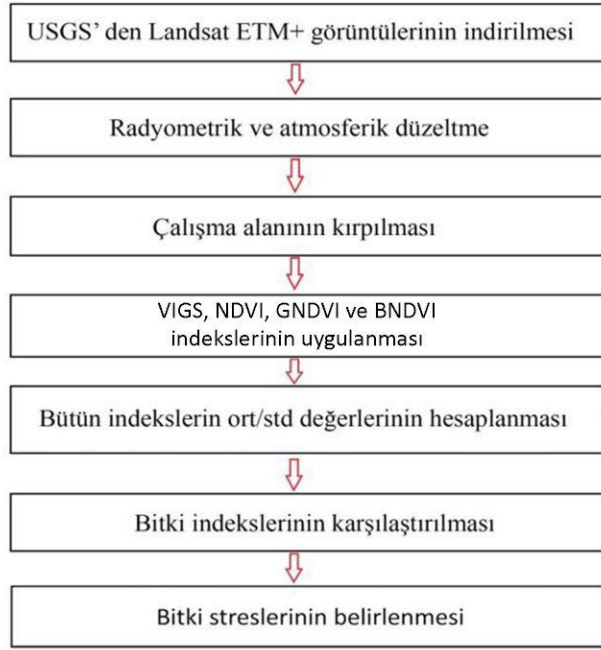
BNDVI: Mavi normalleştirilmiş bitki örtüsü indeksi NDVI’ya benzer, ancak kırmızı yerine mavi spektrumu kullanır (Yang vd., 2004).

$$NDVI = \left(\frac{NIR-R}{NIR+R} \right) \quad (2)$$

$$GNDVI = \left(\frac{NIR-G}{NIR+G} \right) \quad (3)$$

$$BNDVI = \left(\frac{NIR-B}{NIR+B} \right) \quad (4)$$

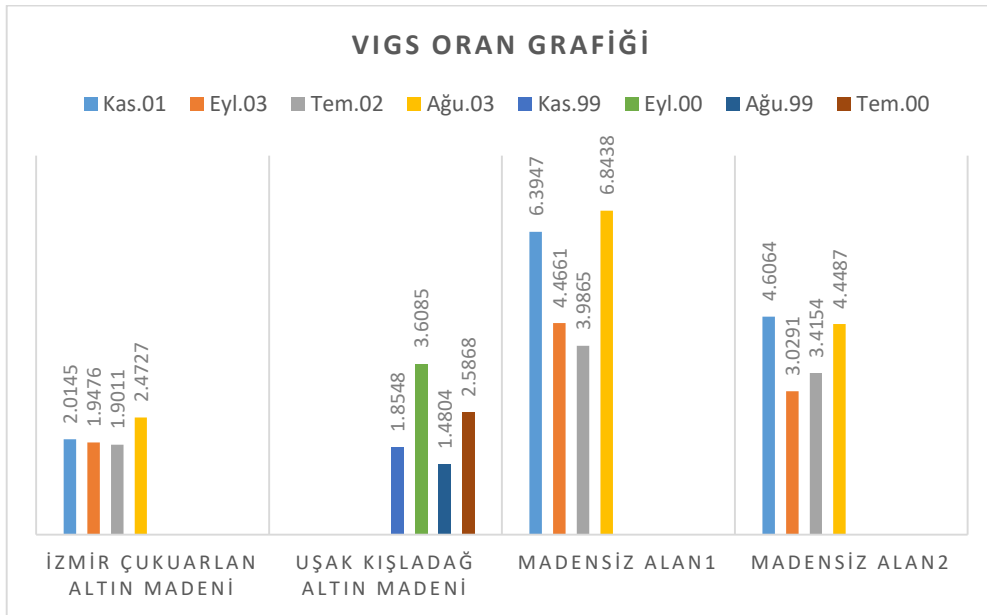
Hesaplamaların ardından elde edilen VIGS değerleri ile NDVI, GNDVI, BNDVI değerleri arasında anlamsal bir ilişki olup olmadığını anlamak adına VIGS-NDVI, VIGS-GNDVI, VIGS-BNDVI ikililerine MATLAB yazılımında lineer regresyon işlemi uygulanmıştır.



Şekil 2. İş akış şeması

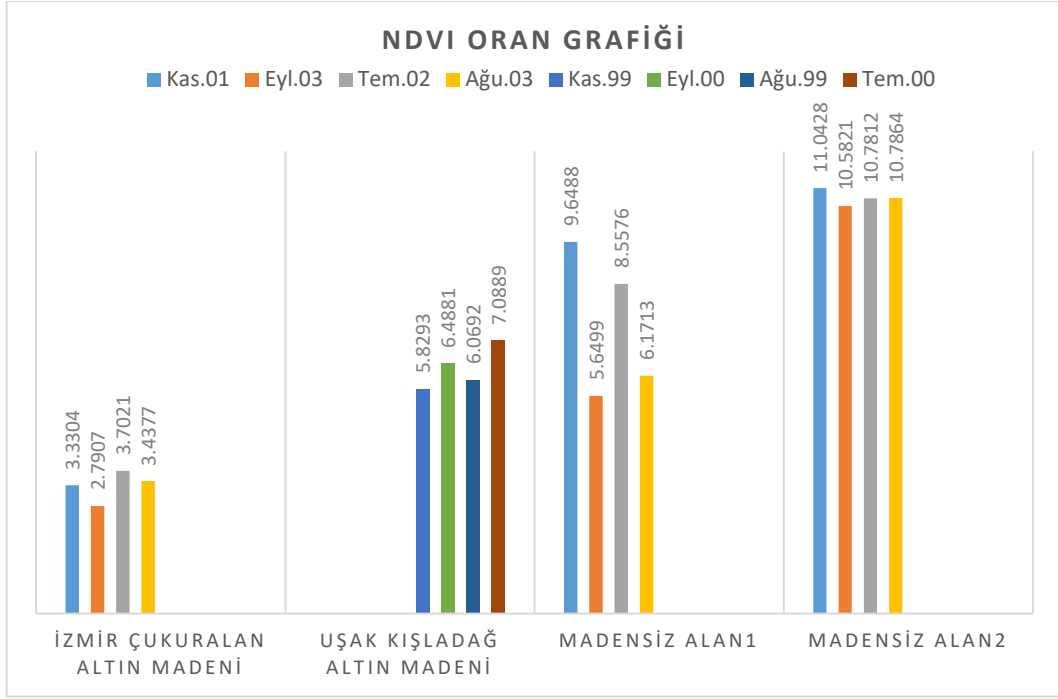
3. Bulgular

Sırasıyla İzmir Çukuralan altın madenine ait Kasım 2001, Eylül 2003, Temmuz 2002, Ağustos 2003 ve Uşak Kışladağ altın madenine ait Kasım 1999, Eylül 2000, Ağustos 1999, Temmuz 2000 tarihlerine ait ve bu tarihlere ait 2 adet madensiz ve bitki örtüsüyle kaplı alanların tüm VIGS değerlerine ait ortalama/standart sapma değerlerine bakılarak çıkarımlar yapılmış ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

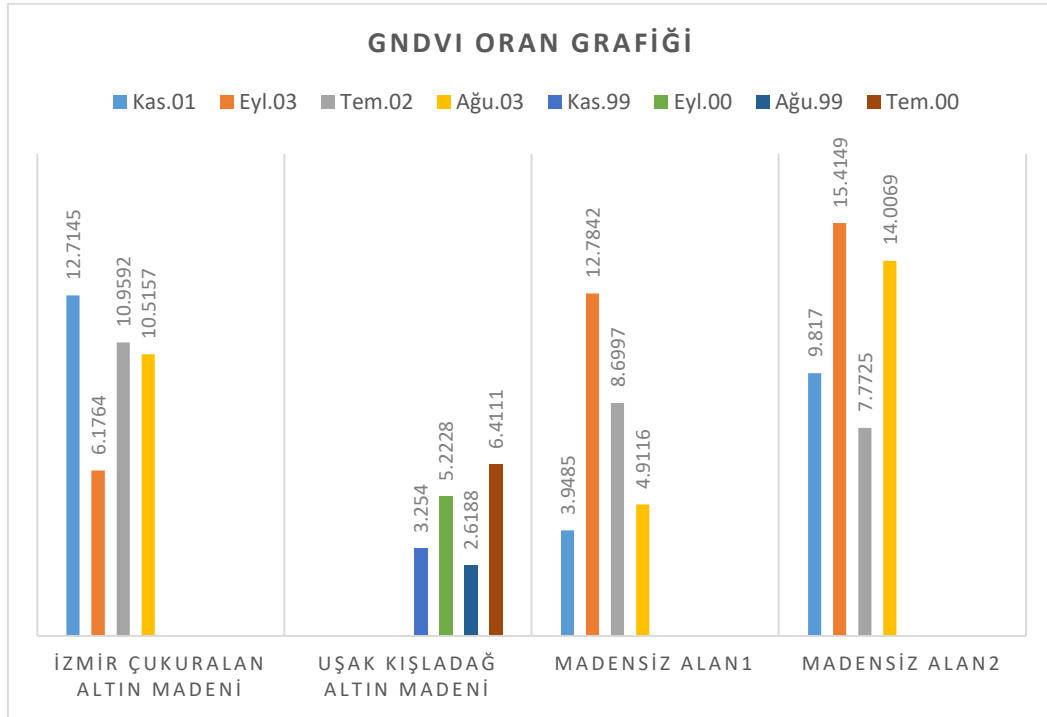


Şekil 3. VIGS (ortalama/standart sapma) oran grafiği

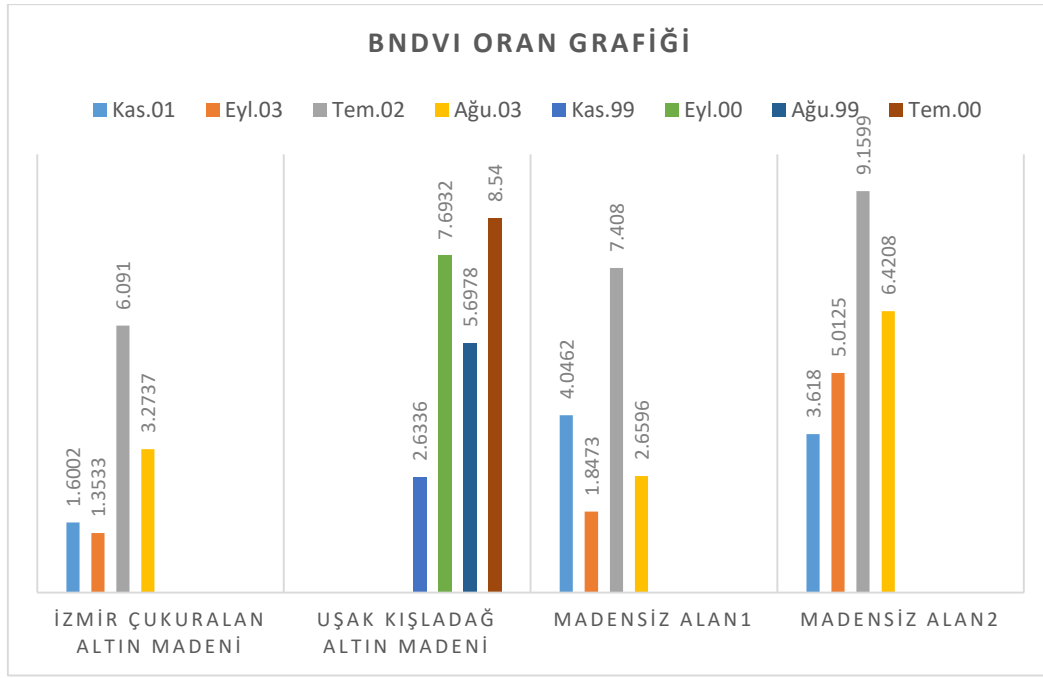
Sonuç olarak VIGS indeks ortalama/standart sapma oran değerlerinde de açıkça görüldüğü gibi altında maden bulunan ağaçlık alanların sonbahar-yaz mevsim geçişlerinde yansımaları arasındaki değişimler küçük değerler almaktadır. Altında maden olmayan ağaçlık alanlarda ise sonbahar-yaz mevsim geçişlerinde yansımaları arasındaki değişimler büyük değerler almaktadır. Maden yatağı bulunan alanlarda beklenildiği gibi sonuçlar elde edilmiştir. Yansımaları arasındaki geçişler küçük değerler almıştır ve büyük oranda maden ürünü elde edilmiştir.



Şekil 4. NDVI (ortalama/standart sapma) oran grafiği



Şekil 5. GNDVI (ortalama/standart sapma) oran grafiği



Şekil 6. BNDVI (ortalama/standart sapma) oran grafiği

Yukarıda bulunan Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilen sonuçlarda da görüldüğü üzere NDVI, GNDVI, BNDVI bitki indeksleri için hesaplanan ortalama/standart sapma oranlarından NDVI dışında maden tespiti için gözle görülür bir sonuç elde edilememiştir. Diğerlerine nazaran NDVI, VIGS kadar başarılı olmamakla birlikte bitki stresiyle ilgili daha güvenilir sonuçlar vermiştir. Bu nedenle Landsat ETM+ verileriyle maden tespiti çalışmaları bu indeksler (GNDVI, BNDVI) ile desteklenemez.

VIGS ve diğer bitki indeksleri arasında anlamsal bir ilişki olup olmadığını anlayabilmek amacıyla elde edilen indeks sonuçlarından yararlanılarak VIGS-NDVI, VIGS-GNDVI ve VIGS-BNDVI olmak üzere ikili gruplara lineer regresyon işlemi uygulanmıştır (Chatterjee ve Hadi, 1986). Tablo 2'de gösterildiği gibi VIGS-NDVI ikilisi için p değeri 0.0497 olarak elde edilmiş olup, değer 0.05'den küçük olduğu için VIGS ve NDVI sonuçları arasında anlamlı bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. VIGS-GNDVI ve VIGS-BNDVI ikilileri için ise elde edilen p değerleri sırasıyla 0.8632 ve 0.8769 olarak elde edilmiş olup, bu değerler 0.05 değerinden büyük oldukları için VIGS ile GNDVI ve BNDVI indeksleri arasında anlamsal bir ilişki bulunamamıştır (Sun vd., 2019).

Tablo 2. VIGS ile diğer indeksler arasındaki lineer regresyon sonuçları

Lineer regresyon uygulanan indeksler	P-değeri
VIGS-NDVI	0.0497
VIGS-GNDVI	0.8631
VIGS-BNDVI	0.8769

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Çukuralan (İzmir) ve Kışladağ (Uşak) bölgelerine ait hem toprak altında altın madeni bulunan hem de bulunmayan ağaçlık alanlar için belirlenen tarihlerdeki Landsat ETM+ uydu görüntülerine, VIGS, NDVI, GNDVI, BNDVI indeksleri MATLAB yazılımında uygulanarak madenli ve madensiz alanlarda indeks sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca kullanılan indekslerin maden tespitinde güvenilirlik seviyelerini araştırmak amacıyla indeks sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Metal kaynaklı bitki stresi arttıkça anomali miktarı artmaktadır. Bunun sonucunda ise sonbahar ve yaz aylarına ait görüntüye uygulanan VIGS ve NDVI indeks sonuçlarından elde edilen değerlerin, ortalama/standart sapma oranları arasındaki farklar küçük değerler almıştır. Hesaplama işleminin ardından Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilen değerler elde edilmiştir.

Regresyon işlemi sonuçları da dikkate alınarak elde edilen sonuçlar; VIGS indeks ve daha düşük güvenilirlikle NDVI bitki indeksinin sık ağaçların bulunduğu alanlarda henüz keşfedilmemiş maden yataklarının tespit edilmesinde kullanılabileceği görülmüştür. Fakat orta çözünürlüklü Landsat ETM+ uydu görüntülerinden maden tespiti için GNDVI ve BNDVI bitki indeksleri güvenilir sonuçlar vermemiş olup diğer indekslere göre çok zayıf kalmıştır. Daha yüksek çözünürlüklü uydu verilerinin veya hava fotoğraflarının kullanılması ve yanlış sonuçlara yol açacak gölgelerin yok edilmesi (Sun vd. 2019) ağır metallere maruz kalan bitkilerin yansıma değerlerindeki değişim miktarının dolayısı ile anomalilerin tespitini daha iyileştireceği öngörülmektedir.

Kaynaklar

- AMD. (2022, Ağustos 8). Türkiye'deki altın madenleri. Altın Madencileri Derneği (AMD). Retrieved from <https://altinmadencileri.org.tr/aktif-olan-altin-madenleri/>
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1-2), 95-120.
- Baran, H. A. (2021). Hakkâri ili baz metal yataklarının uzaktan algılama ile belirlenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 339-347.
- Buschmann, C., & Nagel, E. (1993). In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14(4), 711-722.
- Carranza, E. J. M., & Hale, M. (2001, July). Remote detection of vegetation stress for mineral exploration. In *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)* (Vol. 3, pp. 1324-1326). IEEE.
- Chatterjee, S., & Hadi, A. S. (1986). Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression. *Statistical Science*, 1(3), 379-393.
- Fu, P., Zhang, W., Yang, K., & Meng, F. (2020). A novel spectral analysis method for distinguishing heavy metal stress of maize due to copper and lead: RDA and EMD-PSD. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206, 111211. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111211.
- Hede, A. N. H., Kashiwaya, K., Koike, K., & Sakurai, S. (2015). A new vegetation index for detecting vegetation anomalies due to mineral deposits with application to a tropical forest area. *Remote Sensing of Environment*, 171, 83-97.
- Hede, A. N. H., Koike, K., Kashiwaya, K., Sakurai, S., Yamada, R., & Singer, D. A. (2017). How can satellite imagery be used for mineral exploration in thick vegetation areas?. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(2), 584-596.
- Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11(3-4), 185-200.
- Jiang, H., Yao, M., Guo, J., Zhang, Z., Wu, W., & Mao, Z. (2022). Vegetation Monitoring of Protected Areas in Rugged Mountains Using an Improved Shadow-Eliminated Vegetation Index (SEVI). *Remote Sensing*, 14(4), 882-899.
- Jin, M., Liu, X., & Zhang, B. (2017). Evaluating heavy-metal stress levels in rice using a theoretical model of canopy-air temperature and leaf area index based on remote sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(7), 3232-3242.
- Lee, G., Hwang, J., & Cho, S. (2021). A novel index to detect vegetation in urban areas using UAV-based multispectral images. *Applied Sciences*, 11(8), 3472-3490.
- Ren, H. Y., Zhuang, D. F., Pan, J. J., Shi, X. Z., & Wang, H. J. (2008). Hyper-spectral remote sensing to monitor vegetation stress. *Journal of Soils and Sediments*, 8(5), 323-326.
- Sun, G., Huang, H., Weng, Q., Zhang, A., Jia, X., Ren, J., ... & Chen, X. (2019). Combinational shadow index for building shadow extraction in urban areas from Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 53-65.
- TÜPRAG. (2022, Ağustos 8). Kışladağ altın madeni - Uşak. Retrieved from <https://web.archive.org/web/20200211071400/http://www.tuprag.com.tr/tr/projelerimiz/kisladag-altin-madeni/7/projenin-tanitimi-ve-amaci/24>
- USGS. (2022, Ağustos 8). USGS Earth Explorer. Retrieved from <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Yang, C., Everitt, J. H., Bradford, J. M., & Murden, D. (2004). Airborne hyperspectral imagery and yield monitor data for mapping cotton yield variability. *Precision Agriculture*, 5(5), 445-461.
- Zhang, C., Yang, K., Wang, M., Gao, P., Cheng, F., Li, Y., & Xia, T. (2019). A new vegetation heavy metal pollution index for detecting the pollution degree of different varieties of maize under copper stress. *Remote Sensing Letters*, 10(5), 469-477.

Taşkın Duyarlılık Haritalarının Oluşturulmasında Kullanılan Yöntemler

Methods Used in Flood Susceptibility Mapping

Çağla Melisa Kaya^{1*} 

¹İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Sosyal ve Beşeri Bilimler Fakültesi, Coğrafya Bölümü, 35620, İzmir/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Çağla Melisa Kaya
caglamelisa@gmail.com

doi: 10.48123/rsgis.1129606

Yayın süreci

Geliş tarihi: 12.06.2022
Kabul tarihi: 21.08.2022
Basım tarihi: 18.09.2022

Özet

Son yüzyılda taşkın afetinin ön görülebilen muhtemel zararları ve etkilerini minimize etmek için yapılan bütüncül taşkın yönetimi yaklaşımları arasında taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulması önemli bir yere sahiptir. Bu bağlamda, bölgesel ölçekte taşkın duyarlılık analizleri pek çok araştırmacı tarafından araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmada taşkın duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanılan hesaplama yöntemleri irdelenmiştir. Bu kapsamda taşkın duyarlılığı ile ilgili 2014-2022 yılları arasında yayımlanmış 155 çalışma değerlendirilmiştir. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık değerlendirmelerinde 125'den fazla yöntem kullanıldığı belirlenmiştir. Bu yöntemler arasında çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri, fiziksel tabanlı hidrolojik modeller, istatistiksel yöntemler ve çeşitli esnek hesaplama yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Geleneksel istatistiksel yöntemlerin ve çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanım oranının araştırmacılar arasında halihazırda yüksek olduğu, ancak yıllar içinde geleneksel yaklaşımlardaki uzman görüşlerinin temel alındığı yöntemlerden, büyük verilere dayalı istatistiksel ve makine öğrenimi yöntemlerine doğru evrilmiş olduğu görülmüştür. Bununla birlikte son yıllarda makine öğrenimi, bulanık mantık, metasezgisel optimizasyon algoritmaları ve sezgisel arama algoritmalarının duyarlılık haritalarının oluşturulmasında ön plana çıktığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Taşkın duyarlılık haritalaması, Esnek hesaplama, ÇKKV, İstatistiksel yöntemler, Makine öğrenimi, Metasezgisel optimizasyon algoritmaları

Abstract

In recent years, flood susceptibility mapping has an important place among the studies carried out to take precautions against floods and mitigate the damages and possible negative effects caused by floods. In this context, flood susceptibility analysis, especially on a regional scale, has been the subject of research by many researchers. In this study, the methods used in flood susceptibility mapping were investigated. 155 studies on flood susceptibility published between 2014 and 2022 were evaluated. In general, the methods used in the determination and evaluation of flood susceptibility are multi-criteria decision making (MCDM) methods, physically based hydrological models, statistical methods and various soft computing methods. Although the use rate of traditional statistical methods and multi-criteria decision making methods is already high among researchers, the methods used in flood susceptibility analysis have evolved over the years from traditional human judgments to statistical methods based on big data and machine learning methods. In the reviewed studies, it has been observed that machine learning, fuzzy logic, metaheuristic optimization algorithms and heuristic search algorithms, which are soft computing methods, have been widely used in the flood susceptibility mapping in recent years.

Keywords: Flood susceptibility mapping, Soft computing, MCDM, Statistical methods, Machine learning, Metaheuristic optimization algorithms

1. Taşkın Afeti

Taşkınlar insanlığın yaşamını etkileyen ve kayıplara neden olan doğa kökenli afetlerdendir. Taşkın Direktifi'ne göre taşkın; normal olarak suyla kaplı olmayan kara parçasının su ile geçici olarak kaplanmasıdır (Avrupa Komisyonu, 2007). Yaygın olarak ani gelişen yerel ve kısa süreli olaylar halinde gerçekleşmektedir (USGS, 2022). Taşkın olayı hidrolojik döngünün doğal bir parçası olmasının yanı sıra, taşkın afeti neden olduğu zararlar ve meydana gelme sıklığı açısından değerlendirildiğinde artan bir eğilim göstermektedir (Kundzewicz vd., 2013). Taşkın, küresel olarak en sık görülen doğal afettir (Jha vd., 2012). EM-DAT (2014) ve DFO (2014), taşkın olaylarının çöl ve kutup bölgeleri için birkaç istisna dışında her kıtada ve neredeyse tüm ülkelerde yaşanmakta olduğunu göstermektedir (Custer, 2015). Ayrıca, EM-DAT (2014)'a göre, 1980-2015 yılları arasında meydana gelen şiddetli taşkın olaylarının sayısında yaklaşık yüzde 300'ün üzerinde bir artış olmuştur (Custer, 2015). Bununla birlikte literatürde taşkın riskinin gelecekte daha da artmasının beklendiği genel görüş olarak kabul edilmektedir (Jha vd., 2012).

Taşkın afetinin oluşumuna neden olan olaylar her ne kadar iklimsel etmenlerle ilişkili olsa da afetin şiddetini etkileyen önemli parametrelerden birisi insan faaliyetleridir. İnsan faaliyetlerinin yoğunlaştığı alanların yaşamsal ihtiyaçların karşılandığı bölgelerin olması tabii süreçlerdir. Suyun canlılığın temel ihtiyacı olmasının yanı sıra sulak bölgelerdeki yaygın biyolojik çeşitlilik, ılıman iklim koşulları, tarıma elverişli alanlar ve ulaşım gibi faydalarından dolayı su kaynaklarına yakınlık ilk medeniyetlerden bu yana insanlığın yerleşim alanlarının yer seçiminde etkili olmuştur (Kaya, 2017). Su kaynaklarına yakın alanlar sağladığı tabii olanaklar nedeniyle yaşam için elverişli olması nedeniyle dünya nüfusunun önemli bir oranı bu alanlarda yerleşim ve ekonomik faaliyetler göstermektedir. Bu durumun neticesi olarak taşkın olayının insan ve insan faaliyetlerinde kayıplara neden olduğu afet olayına dönüşmesi, çöllerde dahi taşkınların meydana gelebildiği göz önünde bulundurulduğunda, bu alanlarda meydana gelmesi kaçınılmaz olmaktadır. Özetle, çeşitli doğa olaylarının (geniş bir alanda uzun süreli yağışlar, bölgesel gök gürültülü sağanak yağışlar, büyük kar kütlelerinin hızla erimesi, baraj yıkılmaları, heyelanlar vb.) tetiklenmesi neticesinde meydana gelebilen taşma hadisesinin taşkın afeti olarak insanlığı etkileme şiddeti nüfusun bu bölgelerdeki yoğunluğu ve faaliyetleri ile ilişkilidir. Son 50 yılda meydana taşkın olaylarının şiddetinin ve sıklığının artmasına bağlı olarak dünya genelinde taşkınlar nedeniyle yaşanan can kayıpları ve ekonomik kayıplarda artış meydana gelmiştir (Shuncai ve Katayama, 1994; Jeb ve Aggarwal, 2008; EM-DAT, 2012). EM-DAT tarafından yayınlanan istatistiksel verilere göre, özellikle 1960 yılından sonra gerçekleşen taşkın olayları sebebiyle kıta başına etkilenen kişi sayısı ve ekonomik kayıplarda oldukça fazla artış olmuştur. Bununla birlikte, 1980-2000 yılları arasında depremlerden daha fazla can kaybına neden olan taşkınlar, Birleşmiş Milletler Kalkınma Programında (UNDP-United Nations Development Programme, 2004) tropikal siklonlardan sonra ikinci sırada can kaybına sebep olan doğa kökenli felaket olarak belirtilmiştir. Dünya Bankası'nın 2020 verilerine göre ise; küresel çapta 1,47 milyar insan (dünya nüfusunun yaklaşık %19'u), "100-yıllık sel" olayları sırasında doğrudan ve yoğun olarak akarsu, pluvial veya kıyı taşkınları nedeniyle önemli risklere maruz kalmaktadır (Rentschler ve Salhab, 2020).

1.1 Taşkın Duyarlılığı, Tehlikesi ve Riski

Kırılganlık, uyum kapasitesinin eksikliğinde, çevresel ve sosyal değişimlerle ilişkili streslere maruz kalındığı durumlarda zarar görme bağlamındaki duyarlılıktır (Adger, 2006). Bu tanımdan yola çıkarak duyarlılık; kırılganlık değerlendirmesine katkıda bulunan ve bu değerlendirmelerde yer alması gereken boyutlardan biri olarak ele alınmaktadır (Jacinto vd., 2014; Şekil 1). Doğa kökenli afetlerden özellikle taşkın ve heyelan afetleri neticesinde meydana gelen can kayıpları ve sosyoekonomik hasarların boyutları düşünüldüğünde, bu afetlerin zararlarının azaltılması maksadıyla yapılan afet yönetimi çalışmalarında duyarlılık değerlendirmeleri önemli bir yere sahiptir (Derin Cengiz ve Ercanoğlu, 2022). Bu bağlamda taşkın duyarlılığı literatürde birçok araştırmacı tarafından çalışılmış olup taşkın duyarlılığı Balica vd. (2012) tarafından hidrojeolojik bileşen olarak kabul edilen maruziyet ve kurumsallaşmış sosyo-ekonomik sistemlerle ilişkilendirilerek "bir sistem dayanıklı olma, başa çıkma, iyileşme veya uyum sağlama kapasitesi/yetersizliği ile bağlantılı olarak maruz kalma nedeniyle oluşan durumu" olarak ifade edilmiştir. Taşkın duyarlılığı, genel anlamda taşma olayının "afet hali" olma durumuna neden olan durumsal aktörler dikkate alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda, gelecekte olası taşkın afeti neticesinde oluşabilecek kayıplara göre bölgelerin nispi olarak sınıflandırılmasıdır. Fiziksel parametrelerin kullanıldığı taşkın duyarlılık analizleri ile bölgede afete duyarlı alanlar belirlenerek derecelendirilmektedir (Vojtek ve Vojteková, 2019).



Şekil 1. Kırılganlık indeksinin bileşenleri (Jacinto vd., 2014)

“Taşkın tehlikesi” ve “taşkın riski” kavramları ise birbirleriyle ilişkili olan ancak birbirlerinin yerine kullanılmaması gereken bütüncül taşkın yönetimi çalışmaları için iki temel kavramdır (Kaya, 2017). Taşkın tehlikesi, meydana gelmesi olası bir taşkın olayının gerçekleşmesi durumunda taşkın hız, derinlik ve büyüklüğü göz önünde bulundurularak çevresel etkilenmeyi ifade ederken, taşkın riski taşkın meydana gelme olasılığı ile insan sağlığı, ekonomik aktiviteler ve çevreye vereceği olumsuz sonuçların kombinasyonunu (Avrupa Komisyonu, 2007; Kaya, 2018) ifade etmektedir. Taşkın tehlikesinin belirlenmesi, taşkın afetinden korunma ve taşkın sebep olduğu zararları azaltmak için hazırlık, planlama, yönetim, vb. her türlü aşamada yol gösterici temel altlıklardan biri olup, genel olarak “düşük risk”, “orta risk” ve “yüksek risk” olarak sınıflandırılmaktadır (Kaya, 2018). Tanımlardan da anlaşılacağı üzere, taşkın tehlike analizleri için taşkın duyarlılık analizlerinden daha fazla veriye ihtiyaç duyulmaktadır. Taşkın risk analizlerinde ise, tehlike ve duyarlılık analizlerinden farklı olarak risk altındaki elemanlar ve hasar görülebilirlik gibi konularda ayrıntılı verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum taşkın risk ve tehlike haritalarının oluşturulmasını taşkın duyarlılık haritalarına göre daha da güç kılmaktadır. Tehlike ve riske göre daha sınırlı veriyle üretilebilen duyarlılık haritaları, gelecekte meydana gelebilecek taşkın olaylarına karşı öncül çalışmalarda temel yaklaşımlar için önemli veri kaynaklarıdır. Taşkın duyarlılık haritalarının üretilmesi, görselleştirilmesi, güncellenmesi ve analizi için kullanılan temel ve en yaygın kullanılan araçlar Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) platformlarıdır. Her ne kadar yöntemlerin bir kısmında hesap kısmında farklı araçlar kullanılabilir olsa da özellikle haritaların oluşturulması, taşkın duyarlı bölgelerin analizi ve görselleştirme süreçlerinde CBS platformlarının sunduğu avantajlar kullanılmaktadır (Pradhan, 2012; Tehrany vd., 2015). Duyarlılık analizlerinde temel girdi verilerinden olan arazi kullanım türü ve arazi kullanımındaki değişimlerin belirlenmesi için CBS platformları önemli bir araç haline gelmiştir. Bununla birlikte, uzaktan algılama (UA) alanındaki teknolojik gelişmelerle değişim analizleri, arazi kullanım türü, topografik özellikleri vb. gibi parametrelerin belirlenmesinde UA araçları önemli bir yere sahiptir.

Değişen iklim koşullarının ve arazi kullanımındaki değişimlerin taşkınların üzerindeki etkisi düşünüldüğünde, taşkın duyarlılığı analizleri gelecekte meydana gelebilecek taşkınların önlenmesi ve/veya zararlarının azaltılması için erken uyarı sistemlerinin ve stratejilerinin belirlenmesinde önemli bir yere sahip olacağı açıktır (Vojtek ve Vojteková, 2019).

2. Taşkın Duyarlılığı Çalışmalarının Analizi

Bu çalışmada taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan yöntemler araştırılmıştır. Taşkın duyarlılığı ile ilgili çalışmalarda kullanılan yöntemlerin analizi için Web of Science (WoS)'da bilimsel yayın tarama işlemi yapılmıştır. Taramalarda “title” kısıtı kullanılarak “flood susceptibility” olarak tarama yapılmıştır. Araştırmada tüm yıllar üzerinden sadece makale niteliğindeki yayınlar taranmıştır ve “WoS Çekirdek Koleksiyonu (Web of Science Core Collection)” seçilerek daraltılmıştır. Tarama sonucunda çıkan çalışmalar konuyla ilgi olma durumuna göre elenerek değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu kriterler dahilinde ilk yayımlanan çalışmanın yayımlanma yılı 2014 ve bu çalışma için son veri güncelleme tarihi olan 30.03.2022 tarihleri arasında yayımlanan 155 çalışma detaylı olarak irdelenmiş ve taşkın duyarlılık haritalamasında kullanılan yöntemler analiz edilmiştir.

3. Taşkın Duyarlılık Haritalarının Oluşturulmasında Kullanılan Yöntemler

Literatürde taşkın duyarlılığı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, duyarlılık analizlerinde birbirinden farklı çok sayıda yöntemlerin kullanıldığı görüldüğü de belli başlı yöntemler uygulamada diğerlerine göre daha fazla tercih edilmiştir. Ancak yaygın kullanılan yöntemlerin diğer yöntemlere göre daha üstün olduğu ile ilgili bu alanda çalışan bilim insanları tarafından oluşmuş genel bir kabul olmamakla birlikte, literatürde taşkın duyarlılığının değerlendirilmesinde yaygın kullanılan yöntemler sırasıyla, Çok Kriterli Karar Verme (*Multi-Criteria Decision Making - MCDM*) yöntemleri, fiziksel tabanlı hidrolojik modeller, istatistiksel yöntemler ve çeşitli esnek hesaplama yöntemleridir.

Araştırmacılar tarafından daha objektif sonuçlar veren taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulabilmesi için önerilen bu yöntemler, uzman görüşüne ihtiyaç duyup duymaması ve uygulama kolaylığı açısından birbirlerine göre farklılık göstermektedir.

Taşkın modellemesinde fiziksel tabanlı hidrolojik modeller etkili olup (Dimitriadis vd., 2016; Kaya, 2022), Mike 11, ISIS ve HEC-RAS gibi tek boyutlu ve TELEMAC-2D, RMA2, SRH-2D ve Hydro_AS-2D gibi iki boyutlu modeller sıklıkla kullanılmaktadır (Knebl vd., 2005; Lavoie ve Mahdi, 2017; Tehrany vd., 2019). Fiziksel tabanlı modeller, veri toplama için saha çalışması, büyük bütçe (Fenicia vd., 2014; Tehrany, 2014a) ve önemli hesaplama kaynakları gerektirir ve büyük ölçekli çalışmalar için uygun değildir (Tehrany vd. 2019). Bununla birlikte, diğer yöntemlerin geleneksel hidrolik modellemenin yerini alamayacağı (Sole vd., 2013; Rahmati, 2016), ancak özellikle büyük ölçekli analizlerde veya gelişmekte olan ülkelerde (Albano ve Sole, 2018) kullanılabilecekleri de belirtilmektedir (Vojtek ve Vojteková, 2019). Bu çalışmada, fiziksel tabanlı hidrolojik modeller ile taşkın duyarlılığı analizi yapılan çalışmalar uygulanan yöntemin farklılığından dolayı değerlendirmeye alınmamıştır.

Karar verme, çeşitli alternatifler arasından bir seçim yapma sürecidir. Çok kriterli karar verme; afetler gibi karmaşık yapıdaki problemlerde birçok kriterin birlikte değerlendirilebildiği, alternatiflere değerlerin atanabildiği bir süreç olup, MCDM yöntemleri, aynı anda uygulanan birden fazla kriter içerisinde en iyi tercihin seçilmesine olanak sağlayan yöntemlerdir (Malczewski, 1999). Çok kriterli karar analizi, karar problemlerini yapılandırmak ve alternatif kararları tasarlamak, değerlendirmek ve önceliklendirmek için zengin teknik bir prosedür koleksiyonu sağlamaktadır (Malczewski, 1999). Bir başka deyişle, karar vericilerin birbirinden bağımsız çok fazla sayıda değişkenin ne derecede etkili olduğunu dikkate alarak, probleme ve faktörlere göre en uygun kararı vermelerine imkan sunan yöntemlerdendir (Arslankaya ve Göraltay, 2019). Diğer taraftan, kriterlerin birbiriyle çeliştiği veya kriterlerin sayısal bir değerle ifade edilemediği durumlarda ortak bir dilde çıkarımlar sunarak değerlendirme yapılabilen yöntemlerdir (Arslankaya ve Göraltay, 2019; Hamurcu ve Eren, 2015). Analitik Hiyerarşi Süreci (Analytical Hierarchy Process - AHP), İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralama Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution - TOPSIS), Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process - ANP) (Balogun vd., 2020; Dano vd., 2019), Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory - DEMATEL) (Ali vd., 2020; Wang vd., 2018) ve Ağırlıklı Doğrusal Kombinasyon (Weighted Linear Combination - WLC) (Stavropoulos vd., 2020; Tang vd., 2018 vb.) gibi MCDM yöntemleri basit yapıda olmaları nedeniyle taşkın duyarlılık analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bera vd., 2022; Al-Abadi vd., 2016; Mahmoud ve Gan, 2018). Bununla birlikte, MCDM yöntemleri büyük ölçüde uzman görüşüne dayanan ve subjektif sonuçlar veren yöntemlerdir (Chowdary vd., 2013). Buna rağmen, analiz tarihine kadar ortaya çıkmamış ancak potansiyel bir etkiyi dikkate alabilmesi de yöntemin güçlü yanındır.

İstatistiksel yöntemler, matematiksel ifadelerle dayalı olarak taşkınları tetikleyen faktörler ile taşkınlar arasındaki korelasyonu değerlendirmek için yaygın olarak kullanılan dolaylı yöntemlerdir (Dai ve Lee, 2002; Chen ve Wang, 2007; Wubalem vd., 2022). Taşkın duyarlılık değerlendirmelerinde en yaygın kullanılan istatistiksel yöntemler iki değişkenli istatistiksel analiz (BSA-Bivariate Probability Model) ve Çok Değişkenli İstatistiksel Analiz (MSA) yöntemleridir. BSA yöntemlerinden Frekans Oranı (FR-Frequency Ratio) yöntemi, her bir faktör sınıfının taşkın üzerindeki etkisini ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Jebur vd., 2014). Tipik bir MSA yöntemi olan Lojistik Regresyon (LR-Logistic Regression) ise taşkın oluşumunu etkileyen her bir faktörün etkisini belirler (Jebur vd. 2014). Bu istatistiksel analiz yöntemlerinin, taşkın duyarlılık değerlendirmesinde çok iyi performansla sahip olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmiştir (Rahmati vd., 2016; Liu vd., 2022). Bununla birlikte, istatistiksel yöntemler doğrusal varsayımlara dayanan tahmin edilen değişkenlere dayanırken, taşkının kompleks mekanizması nedeniyle genellikle doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir (Costache ve Bui, 2019; Tehrany vd., 2015; Liu vd., 2022). Taşkınların karmaşık doğası araştırmacıları geleneksel/kesin/katı hesaplama yöntemlerinden, gerçek yaşamı daha iyi yansıtan sezgisel yaklaşımların kullanıldığı esnek hesaplama yöntemlerine geçiş yapmaya teşvik etmiştir.

Gerçek yaşama dair problemler, doğal belirsizlikler içermektedir (Derin Cengiz, 2020). Araştırmacılar tarafından karmaşık gerçek yaşam problemlerinin belirsizliklerle ilgili sorunlarını çözmek için sezgisel yaklaşımlara dayanan farklı çözümler önerilmiştir. Esnek hesaplama yöntemi sayısal zekaya sahip, belirli açılardan insan uzmanlığına denk uzmanlık emsalinde analiz çevresini değiştirebilen ve daha iyi sonuçlar üretmek için öğrenebilen, kararlarını nedenleriyle sunabilen sistemler tasarlamaya yönelik bir yaklaşımdır (URL-1, 2022). Bulanık küme teorisini geliştiren Zadeh (1994), esnek hesaplamayı şu şekilde ifade etmiştir: "Esnek hesaplama, kolay işlenebilirlik, sağlamlık ve düşük çözüm maliyetleri elde etmek için belirsizlik ve kararsızlıkların toleransından faydalanan çeşitli yöntemlerin toplamıdır. Temel bileşenleri; bulanık mantık, sinirsel programlama ve olasılık teoremleridir. Esnek hesaplamanın temelinde yatan fikir, insan zekasının bilişsel yaklaşım modelini oluşturmaktır. Esnek hesaplamanın rol modeli ise insan zekasıdır" (URL-1, 2022). Katı hesaplamanın aksine, bulanıklık, belirsizlik, kısmi doğruluk ve yaklaşıklıklara karşı toleranslı olan esnek hesaplama; bulanık mantık, genetik algoritmalar, yapay sinir ağları, makine öğrenimi ve uzman sistemleri gibi tekniklere dayanmaktadır (İbrahim, 2016). Esnek hesaplama karmaşık yapıda, belirsizlik içeren gerçek yaşam problemlerinin çözümlenmesi için hesaplamalar ile zeki yöntemlerin kombinasyonunu sunmaktadır (URL-2, 2022).

Zadeh (1994), esnek hesaplamanın tek bir yöntem olmaktan ziyade, bulanık mantık, sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi çeşitli yöntemlerin bir kombinasyonu olduğunu belirtmiştir. Tüm bu yöntemler birbiriyle rekabet etmek yerine birbirlerini tamamlayıcı niteliğe sahiptir ve belirli bir problemi çözmek için birlikte kullanılabilirler (Buckley ve Hayashi, 1994; İbrahim, 2016). Çok farklı alanlarda kullanılan esnek hesaplama yöntemleri son yıllarda heyelan ve taşkın duyarlılık analizlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır.

Yukarıda değinildiği üzere, taşkın duyarlılığı analizlerinde kullanılan yöntemler yıllar içinde, geleneksel uzman görüşlerine dayanan yöntemlerden, büyük verilere dayalı istatistiksel yöntemlere ve makine öğrenimi yöntemlerine doğru evrilmiştir (Li vd., 2019; Liu vd., 2022). Sürekli gelişen makine öğrenimi algoritmaları, taşkın duyarlılığı tahmininde giderek daha kapsamlı bir şekilde uygulanmaya başlanmıştır (Kia vd., 2012; Pradhan, 2012; Liu vd., 2022). Rastgele Orman (RF-Random Forest) (Wang vd., 2015), Yapay Sinir Ağları (ANN-Artificial Neural Networks) (Li vd., 2013), SVM (Tehrany vd., 2015) ve Karar Ağacı (DT-Decision Tree) (Tehrany vd., 2013) çalışmalarda en çok kullanılan makine öğrenimi algoritmaları olup, taşkın duyarlılık analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Liu vd., 2022).

Doğrusal olmayan modellemelerde kullanılan metasezgisel algoritmalar, özellikle büyük ölçekli optimizasyon problemlerinin doğasındaki değişiklikleri yakalamak için kullanılan ve literatürde hızla yaygınlaşan aktif bir araştırma alanıdır (Bui vd., 2020). Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, gerçek dünya optimizasyon problemleri için çok iyi çözümler sunmaktadır (Neumüller vd., 2011). Taşkın duyarlılık değerlendirmelerinde kullanımı gittikçe artan metasezgisel optimizasyon algoritmaları (Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO-Particle Swarm Optimization), Gri Kurt Optimizasyonu (GWO), Yarasa Algoritması (BA-Bat Algorithm) vb. özellikle makine öğrenimi yöntemleriyle oluşturulan hibrit modellerde oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Arora vd., 2021; Bui vd., 2020; Rahmati vd., 2020). İki veya daha fazla yöntemin bir arada kullanıldığı hibrit modellerde, çeşitli istatistiksel veya makine öğrenimi yöntemleri, farklı istatistiksel, MCDM, metasezgisel algoritma veya makine öğrenimi yöntemleriyle entegre olarak kullanılabilir (Tehrany vd., 2014a; Arora vd., 2021; Bui vd., 2020; Rahmati vd., 2020; Ali vd., 2020). Pham vd. (2018) hibrit modellerin, LR, FR, Kanıt İnanç İşlevi (EBF-Evidential Belief Function) ve Kanıt Ağırlıkları (WoE-Weight of Evidence) gibi iki değişkenli istatistiksel modellerin tahmin doğruluğunu iyileştirdiği ve artırdığını belirtmiştir (Shahabi vd., 2021). Son yıllarda yapılan taşkın duyarlılığı çalışmaları incelendiğinde, kullanılan yöntemler arasında özellikle hibrit modeller öne çıkmaktadır.

3.1. İncelenen Çalışmalarda Kullanılan Yöntemler

Bu çalışma kapsamında incelenen 155 taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulması ile ilgili çalışmada kullanılan yöntemler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 1'e göre MCDM yöntemlerinden sırasıyla AHP, ANP, WLC ve DEMATEL yöntemlerinin en fazla tercih edildiği görülmektedir. Nitelikli İdeal-Gerçek Karşılaştırma Analizi (MAIRCA), Kaba Küme Teorisi (RST-Rough Sets Theory), VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje), Basit Ağırlıklı Toplam (Simple Additive Weighting Method - SAW), TOPSIS, Çok Nitelikli Sınır Yakınlaştırma Alanı Karşılaştırması (MABAC-Multi-Attributive Border App- Roximation Area Comparison) ve Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi (SWARA - Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemleri ise çalışmalarda kullanılan diğer MCDM yöntemleridir. Her ne kadar incelenen çalışmalarda 11 farklı MCDM yöntemi kullanılmış olsa da %61 oranıyla AHP yöntemi diğer MCDM yöntemlerine kıyasla çok daha fazla tercih edilmiştir (Şekil 3). Ayrıca incelenen çalışmaların %24'ünde AHP yöntemi kullanılmıştır. AHP yöntemi, öncelikli ölçeklerin türetilmesinin uzmanların kararlarına dayandığı, ikili karşılaştırmalı bir ölçme teorisidir (Saaty, 1985). Hiyerarşik yapı oluşturularak karmaşık problemlerin basitleştirilmesine olanak sağlayan AHP yönteminde, karar verme sürecinde karar vericinin bilgi ve tecrübesi de sürece dahil edilmektedir. Karar seçeneklerinin değerlendirilip seçilmesinde nitel ve nicel kriterlerinin de kullanılmasına imkan veren bir yöntemdir.

İki değişkenli istatistiksel yöntemler bağımsız bir değişken sınıfındaki taşkın oluşumunu ölçmek için kullanılmaktadır (Tehrany vd., 2014b). İki değişkenli olasılık modeli kullanılarak, taşkın olan alanlarla taşkın oluşumuna katkıda bulunan değişkenlerin her biri arasındaki uzamsal ilişki belirlenmektedir (Tehrany vd., 2014b). İki değişkenli olasılık ne kadar büyükse, taşkın oluşumu ile değişken arasındaki ilişki o kadar güçlüdür (Lee ve Talib, 2005; Lee ve Pradhan, 2007).

Tablo 1'e göre, taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan istatistiksel yöntemler arasında en çok tercih edilen iki değişkenli bir istatistiksel yöntem olan FR yöntemi (%60, Şekil 4), incelenen çalışmaların %19'unda kullanılmıştır. FR yöntemi, meydana gelmiş taşkınların konumsal dağılımı ile taşkın oluşumunu etkileyen faktörlerin arasındaki ilişkiyi (korelasyon) baz alan ve kolay uygulanabilen bir yöntemdir (Tehrany vd., 2014b). İncelenen çalışmalarda kullanılmaya başlanılan iki değişkenli istatistiksel yöntemler sırasıyla, Kanıt Ağırlığı (WOE-Weight of Evidence), kanıt teorisi veya Dempster-Shafer teorisi (DST-Dempster-Shafer Theory), İstatistiksel İndeks (Wi-Statistical Index), Kesinlik Faktörü (CF-Certainty Factor) ve iki değişkenli olasılık modelidir. Diğer taraftan, çok değişkenli istatistiksel yöntemler arasında en çok kullanılan LR yöntemi ile bağımlı bir değişken ile bağımsız birçok değişken arasında çok değişkenli bir regresyon ilişkisi kurulur (Lee, 2005; Tehrany vd., 2014b). Taşkın özelinde değerlendirildiğinde, bağımlı değişken taşkın olayının meydana gelmesi veya gelmemesini temsil ederken, bağımsız değişkenler taşkın oluşumuna etki eden ve yöntemde kullanılan parametreleri temsil etmektedir. İncelenen çalışmaların %15'inde kullanılan LR yöntemini

çalışmalarda kullanılma sayısına göre sırasıyla, diskriminant analizi, Rastgele Alt Örneklem (RS-random subsampling), Genelleştirilmiş Doğrusal Model (GLM-Generalized Linear Model), bootstrapping ve çok değişkenli regresyon olmak üzere çok değişkenli istatistiksel yöntemler izlemektedir (Tablo 1, Şekil 5). Ayrıca incelenen çalışmalarda, LR yönteminin Kernel Lojistik Regresyon (KLR-Kernel Logistic Regression), Bayes Lojistik Regresyon Model (BLRM-Bayesian Logistic Regression Model), Binom Lojistik Regresyon ve Çok Terimli Lojistik Regresyon olmak üzere farklı türleri de kullanılmıştır. Aynı şekilde, diskriminant analizinin; Doğrusal Diskriminant Analizi (LDA-Linear Discriminant Analysis), Esnek Diskriminant Analizi (FDA- Flexible Discriminant Analysis), Çok Değişkenli Diskriminant Analizi (MDA- Multivariate Discriminant Analysis) ve Kuadratik Diskriminant Analizi (QDA-Quadratic Discriminant Analysis) türleri de incelenen çalışmalarda kullanılmıştır (Tablo 1).

Esnek hesaplama yöntemleri son yıllarda farklı disiplinlerce pek çok alanda artan kullanımıyla dikkat çekmektedir. Doğrusal olmayan gerçek hayat problemlerinin çözümünde kesin yargılardan ziyade sezgisel yaklaşımların hakim olduğu çerçeveden çözümler öneren esnek hesaplama yöntemleri bu özellikleri itibari ile taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında da yükselen trend göstermektedir (Şekil 2). İncelenen makalelerde, esnek hesaplama yöntemlerinden olan makine öğrenimi, bulanık mantık, metasezgisel optimizasyon algoritmaları ve sezgisel arama algoritmalarının taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında yaygın kullanılmış olduğu görülmüştür (Tablo 2, Şekil 6). İncelenen makalelerde özellikle, bulanık mantık 12 makalede (alt türleriyle birlikte 23 kez), makine öğrenimi denetimli öğrenme algoritmalarından Karar Ağaçları (DT-Decision Tree) algoritması olan RF 22 kez, Sinir Ağları (NN-Neural Networks) 60 kez, Artırılmış Regresyon Ağaçları (BRT- Boosted Regression Trees) 24 çalışmada ve Destek Vektör Makineleri (SVM-Support Vector Machine) 23 çalışmada (alt türleriyle birlikte 31 kez) kullanılmıştır (Tablo 2, Şekil 7). İncelenen çalışmalarda en çok kullanılan makine öğrenimi algoritması olan sinir ağlarının, özellikle yapay sinir ağları algoritması ve alt türleri oldukça yaygın kullanıma sahiptir (45 kez, Tablo 2). Bu bağlamda, özellikle ANN, Çok Katmanlı Algılayıcılar (MLP- Multilayer Perceptron Network) ve Evrimsel Sinir Ağları (CNN-Convolutional Neural Networks) taşkın duyarlılık analizlerinde kullanımı yaygın olan sinir ağları modellerindedir (Tablo 2). İncelenen çalışmalarda makine öğrenimi denetimli öğrenme yöntemleri tüm makine öğrenim yöntemlerinin %97,6'sını oluşturmaktadır. Aynı çalışmada aynı algoritmanın farklı alt türleri de kullanılabildiği için yukarıda verilen sayılar alt türü olan algoritmalar için makale sayısı olarak değil, kullanım sayısı olarak verilmiştir.

İncelenen çalışmalarda, yaygın kullanıma sahip esnek hesaplama yöntemlerinde biri olan Bulanık Mantık (FL-Fuzzy Logic), makine öğrenme algoritmaları (Costache, 2019; Hong vd., 2018), metasezgisel optimizasyon algoritmaları (Termeh vd., 2018; Arora vd., 2021), istatistiksel yöntemler (Hong vd., 2018) ve MCDM yöntemleri (Ali vd., 2020; Tella ve Balogun, 2020) ile hibrit model oluşturularak taşkın duyarlılık haritalarının üretilmesinde kullanıldığı görülmektedir. Özellikle uzman görüşüne dayalı MCDM yöntemlerinin öznelliğinin giderilmesi ve daha nesnel sonuçların elde edilmesi için AHP, ANP, DEMATEL, TOPSIS vb. MCDM yöntemleriyle hibrit kullanımı (Ali vd., 2020; Tella ve Balogun, 2020) dikkat çekmektedir.

Evrimsel algoritmalar ve sürü zekası tabanlı optimizasyon algoritmaları incelenen makalelerde kullanılan metasezgisel optimizasyon algoritmalarıdır. Evrimsel algoritmalarından sırasıyla Genetik Algoritma (GA-Genetic Algorithm), Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BBO-Biogeography Based Optimization) ve Diferansiyel Evrim (DE-Differential Evolution) (Örn. Saleh vd., 2022; Roy vd., 2021; Arora vd., 2021) sürü zekası tabanlı optimizasyon algoritmalarından ise sırasıyla PSO, GWO, BA, Sosyal Örümcek Optimizasyonu (SSO-Social Spiders Optimization) ve Çekirge Optimizasyon Algoritması (GOA-Grasshopper Optimization Algorithm) en çok kullanılan algoritmalar (Tablo 2). Ayrıca Sezgisel Arama Algoritması K-Star algoritması (Kstar-K-Star Algorithm) da tercih edilen algoritmalar arasındadır (Siam vd., 2021; Ruidas vd., 2022; Tablo 2).

Tablo 1. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan MCDM yöntemleri ve istatistiksel yöntemler

Yöntemler		Çalışma Sayısı		
Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri (MCDM-Multi-Criteria Decision Making Methods)	Analistik Hiyerarşi Süreci (AHP-Analytical Hierarchy Process)	37		
	Analistik Ağ Süreci (ANP-Analytic Network Process)	7		
	Karar Verme Deneme ve Değerlendirme Laboratuvarı (DEMATEL-Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory)	4		
	Ağırlıklı Doğrusal Kombinasyon (WLC-Weighted Linear Combination)	4		
	Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi (SWARA-Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis)	2		
	İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralama Tekniği (TOPSIS-Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)	2		
	Kaba Küme Teorisi (RST-Rough Sets Theory)	Aralıklı Kaba Sayı (IRN-Interval Rough Numbers)	1	
	Nitelikli İdeal-Gerçek Karşılaştırma Analizi (MAIRCA- MultiAtributive Ideal-Real Comparative Analysis)		1	
	VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje)		1	
	Basit Toplamlı Ağırlıklandırma Yöntemi (SAW-Simple Additive Weighting Method)		1	
	Çok Nitelikli Sınır Yakınlaştırma Alanı Karşılaştırması (MABAC-Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison)		1	
İstatistiksel Yöntemler (Statistical Methods)	İki Değişkenli İstatistiksel Yöntemler (BS-Bivariate Statistical Methods)	Frekans oranı (FR-Frequency Ratio)	30	
		Kanıt Ağırlığı (WOE-Weight of Evidence)	7	
		Kanıt Teorisi veya Dempster-Shafer Teorisi (DST-Dempster-Shafer Theory)	6	
		İstatistiksel İndeks (Wi-Statistical Index)	5	
		Kesinlik Faktörü (CF-Certainty Factor)	2	
		İki Değişkenli Olasılık Modeli (Bivariate Probability Model)	1	
	Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemler (MS- Multivariate Statistical Methods)	Lojistik Regresyon (LR-Logistic Regression)		23
			Kernel Lojistik Regresyon (KLR- Kernel Logistic Regression)	2
			Bayes Lojistik Regresyon (BLRM- Bayesian Logistic Regression Model)	1
			Binomial Lojistik Regresyon (Binomial Logistic Regression)	1
			Çok Terimli Lojistik Regresyon (MLR-Multinomial Logistic Regression)	1
			Rastgele Alt Örnekleme (Random Subsampling)	2
			Genelleştirilmiş Doğrusal Model (GLM-Generalized Linear Model)	2
			Bootstrapping	1

		Çok Değişkenli Regresyon (Multivariate Regression)	Kısmi En Küçük Kareler Regresyon (PLSR-Partial Least Squares Regression)	1
		Diskriminant Analizi (Discriminant Analysis)	Doğrusal Diskriminant Analizi (LDA-Linear Discriminant Analysis)	1
			Esnek Diskriminant Analizi (FDA-Flexible Discriminant Analysis)	1
			Çok Değişkenli Diskriminant Analizi (MDA- Multivariate Discriminant Analysis)	1
			Kuadratik Diskriminant Analizi (QDA-Quadratic Discriminant Analysis)	1
	Entropi (Entropy)	Shannon Entropisi (Shannon's Entropy)		7
		Entropi İndeksi (IOE- Index of Entropy)		1
	Diğer İstatistiksel Yöntemler	Ağırlık Faktörü (WF-Weighting Factor)		2
		Monte Carlo Simülasyonu (Monte Carlo Simulation)		1
		Sıralı Ağırlıklı Ortalama (OWA-Ordered Weighted Averaging)		1
		En Yakın Küçültülmüş Merkezler (NSC-Nearest Shrunken Centroids)		1
		Fonksiyonel Veri Analizi (FDA-Functional Data Analysis)		1
		Pearson Korelasyon Katsayısı (PCC-Pearson Correlation Coefficient Korelasyon Katsayısı)		1
		Korelasyon Nitelik Seçimi (CAE-Correlation Attributes Evaluation)		1
		Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform)		1
Gama Operatörü (GO-Gamma Operator)		1		
Gauss süreci (GP- Gaussian Process)		1		

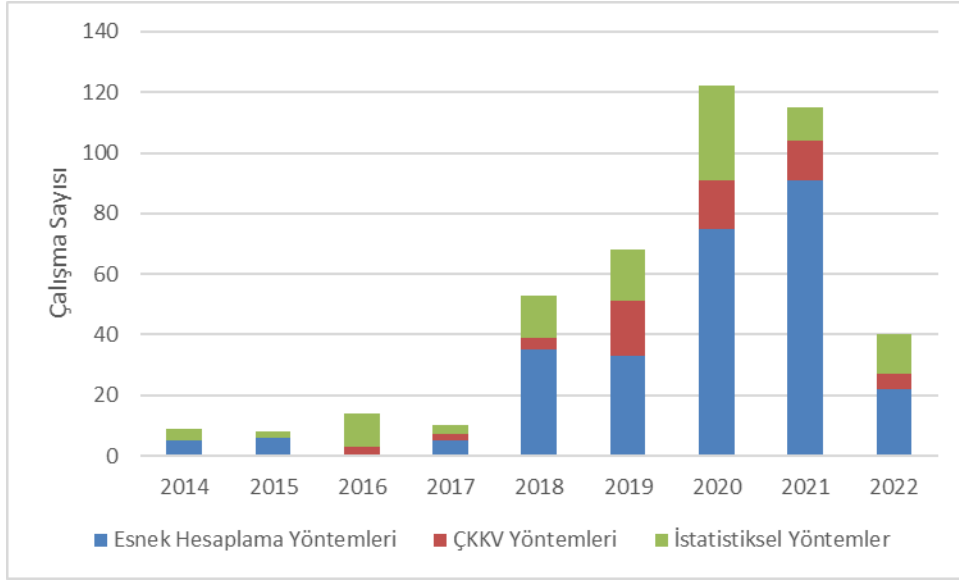
Tablo 2. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan esnek hesaplama yöntemleri

Esnek Hesaplama Yöntemleri (Soft Computing Methods)			Çalışma Sayısı
Metasezgisel Optimizasyon Algoritmaları (Metaheuristic Optimization Algorithms)	Evrimsel Algoritmalar (Evolutionary Algorithms)		
		Genetik Algoritma (GA-Genetic Algorithm)	8
		Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (BBO-Biogeography Based Optimization)	4
		Diferansiyel Evrim (DE-Differential Evolution)	2
		Harmoni Araması (HS-Harmony Search)	1
		İstilacı Yabani Ot Optimizasyonu (IWO-Invasive Weed Optimization)	1
		Kültürel Algoritma (CA-Cultural Algorithm)	1
		Emperyalist Rekabetçi Algoritma (ICA-Imperialist Competitive Algorithm)	1
	Sürü Zekası Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları (Swarm Intelligence Optimization Algorithms)		
		Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO-Particle Swarm Optimization)	5
		Kuantum Parçacık Sürü Optimizasyonu (QPSO-Quantum Particle Swarm Optimization)	1
		Gri Kurt Optimizasyonu (GWO-Grey Wolf Optimization)	3
		Yarasa Algoritması (Bat Algorithm)	2
		Sosyal Örümcek Optimizasyonu (SSO-Social Spiders Optimization)	2
		Çekirge Optimizasyon Algoritması (GOA-Grasshopper Optimization Algorithm)	2
		Arı Algoritması (BA-Bees Algorithm)	1
		Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO-Ant Colony Optimization)	1
		Manta Ray Yiyecek Arama Optimizasyonu (MRFO-Manta Ray Foraging Optimization)	1
		Galaktik Sürü Optimizasyonu (GSO-Galactic Swarm Optimization)	1
	Sezgisel Arama Algoritmaları (Heuristic Search Algorithms)	Tembel Öğrenme (Lazy Learning)	K-Star Algoritması (Kstar-K-Star Algorithm)
Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)	Bulanık Mantık (FL-Fuzzy Logic)		12
	Bulanık Sırasız Kural Algoritması (FURIA-Fuzzy Unordered Rule Induction Algorithm)		3
	Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS-Adaptive-Network Based Fuzzy Inference Systems)		9
	Bulut Model (Cloud Model)		1
Makine Öğrenimi (Machine Learning)	Denetimli Öğrenme (Sınıflandırma • Regresyon) / (Supervised Learning (Classification • Regression))		
		Karar Ağaçları (DT-Decision Tree)	
		Rastgele Orman (RF-Random Forest)	20

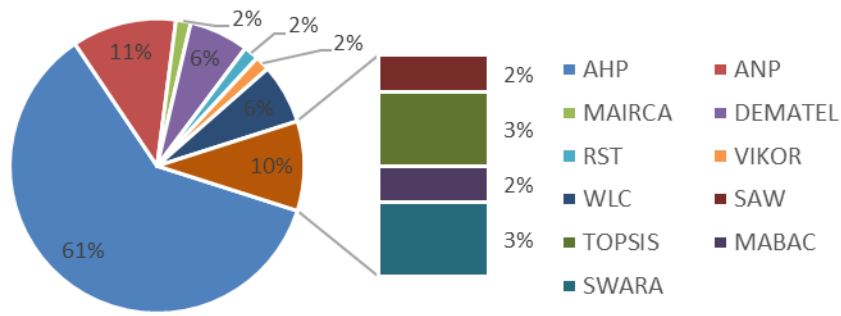
			Paralel Rastgele Orman (PRF-Parallel Random Forest)	1
			Düzenli Rastgele Orman (RRF-Regularized Random Forest)	1
			Sınıflandırma ve Regresyon Ağaçları (CART - Classification and Regression Tree)	7
			Lojistik Model Ağacı (LMTREE- Logistic Model Tree)	4
			Ekstrem Rastgele Ağaçlar (ERT- Extremely Randomized Trees)	3
			Fonksiyonel-Ağaç (Functional-Tree)	3
			Credal Karar Ağacı (CDT-Credal Decision Tree)	2
			Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS- Multivariate Adaptive Regression Spline)	2
			Kısmi Karar Ağacı (PART-Partial Decision Tree)	1
			Best-First Tree (BFT)	1
			Azaltılmış Hata Budama Ağacı (REPT-Reduced Error Pruning Trees)	1
			Rastgele Ağaç (Rtree-Random Tree)	1
			Alternatif Karar Ağacı (Adtree-Alternating Decision Tree (Adtree))	4
			M5 Model Ağacı (M5- M5 Model Tree)	1
		Topluluklar (Ensembles)		
		Torbalama (Bagging)		
			Rastgele Alt Uzay (Random Subspace)	6
		Artırma (Boosting)		
			Artırılmış Regresyon Ağaçları (BRT- Boosted Regression Trees)	8
			Bayes Lojistik Regresyon (Bayesian Logistic Regression)	1
			Ekstrem Gradyan Artırma (XGBoost- Extreme Gradient Boosting)	4
			Uyarlanabilir Artırma (AdaBoost- Adaptive Boosting)	3
			AdaboostM1	3
			Adabag	1
			Logitboost	2
			Gradyan Artırma Ağaçları (GBT-Gradient Boosting Trees)	1
			Treenet / MART	1
			Gradyan Artırma Regresyon (GBR-Gradient Boosting Regression)	1
			Boosted Sınıflandırma (BCT-Boosted Classification)	1
			Lightgbm	1
			Catboost	1

			Multiboostab	1
			Dagging	4
			Bayes	
			Bayes Katkılı Regresyon Ağaçları (BART-Bayesian Additive Regression Trees)	1
			DECORATE (Oppositional Relabeling of Artificial Training Examples)	2
			EMCA (Ensemble Model Committee Averaging)	1
			EMCILNF (Ensemble Model Confidence Interval Inferior)	1
			EMCISUP (Ensemble Model Confidence Interval Superior)	1
			EMCV (Ensemble Model to Estimate The Coefficient of Variation)	1
			EMMEAN (Ensemble Model to Estimate The Mean)	1
			EMMEDIAN (Ensemble Model to Estimate The Median)	1
			EMWMEAN (Ensemble Model Based on Weighted Mean)	1
			K-En Yakın Komşu Algoritması (KNN-K-Nearest Neighbor Algorithm)	5
			Naive Bayes	2
			Naive Bayes Ağacı (NBT-Naive Bayes Tree)	6
			Rastgele Naive Bayes (RNB-Random Naive Bayes)	1
			Çok Terimli Naive Bayes (Multinomial Naive Bayes)	1
			Sinir Ağları (NN- Neural Networks)	
			Yapay Sinir Ağları (ANN-Artificial Neural Networks)	10
			Çok Katmanlı Algılayıcı Ağı (MLP- Multilayer Perceptron Network)	11
			Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF- Radial Basis Function)	2
			Gauss Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF- Gaussian Radial Base Function)	4
			Autoencoder	1
			Derin Öğrenme (Deep Learning)	
			Derin Öğrenme Sinir Ağı (DLNN- Deep Learning Neural Networks)	4
			Derin Sinir Ağı (DNN- Deep Neural Network)	2
			Evrimsimli Sinir Ağları (CNN-Convolutional Neural Networks)	7

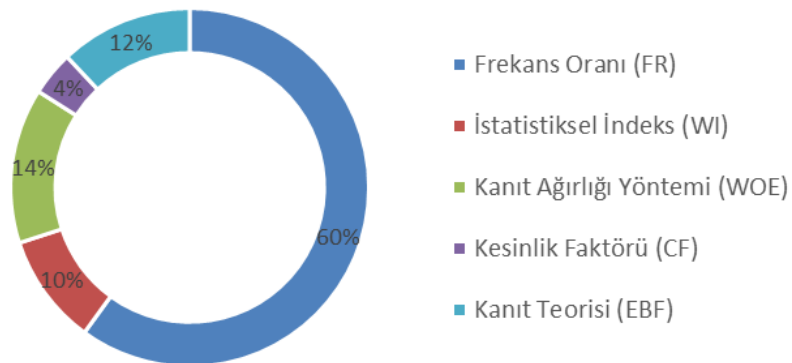
				Derin İnanç Ağı (DBN- Deep Belief Network)	2
				Kendini Düzenleyen Harita (SOM-Self-organizing map)	1
				Öğrenme Vektörü Nicemleme (LVQ- Learning Vector Quantization)	1
				Uzun-Kısa Süreli Bellek (LSTM-Long-Short Term Memory)	1
				Tek Gizli Katmanlı İleri Beslemeli Sinir Ağı (Single-Hidden Layer Feedforward Neural Network)	
				Aşırı Öğrenme (Extreme Learning)	3
				Adaptif Rezonans Teorisi (ART-Adaptive Resonance Theory (ART))	1
				Grup Veri İşleme Yöntemi (GMDH- Group Method of Data Handling)	1
				Destek Vektör Makinesi (SVM-Support Vector Machine)	23
				Linear Kernel (LN) SVM	2
				Polynomial Kernel (PL) SVM	2
				Sigmoid Kernel (SIG) SVM	2
				Weakly Labeled SVM (WELLSVM)	1
				Multiple Kernel SVM	1
				Destek Vektör Regresyonu (SVR-Support Vektör Regression)	5
				SVMreg	1
				Hyperpipes (HP)	1
				Boyut Azaltma (Dimensionality Reduction)	
				Temel Bileşenler Analizi (PCA-Principal Component Analysis)	
				Rotasyon Ormanı (ROF- Rotation Forest)	4
				Yapılandırılmış Kestirim (Structured Prediction)	
				Grafik Modeller (Graphical Models)	
				Bayes İnanç Ağları (BBN- Bayesian Belief Networks)	1



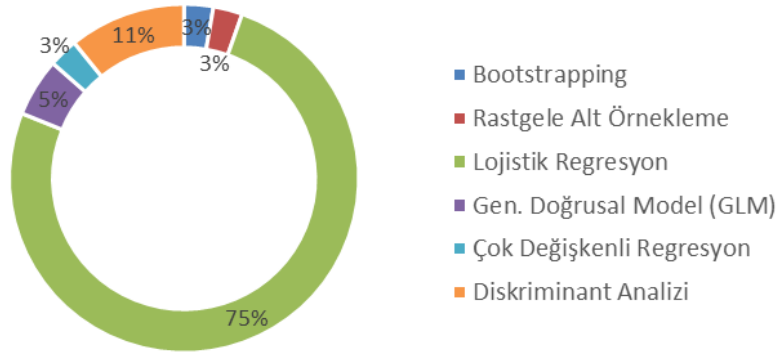
Şekil 2. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan yöntemlerin yıllara göre dağılımı



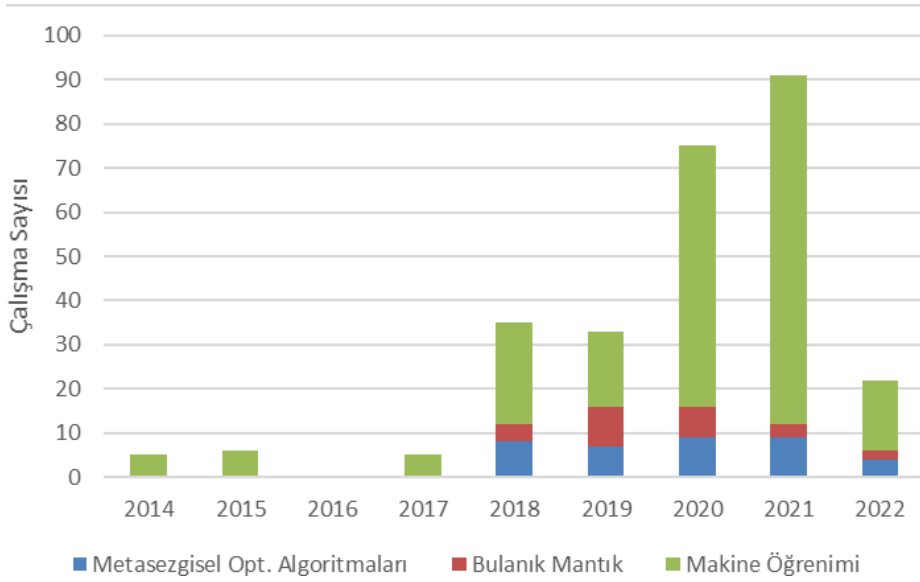
Şekil 3. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan MCDM yöntemler



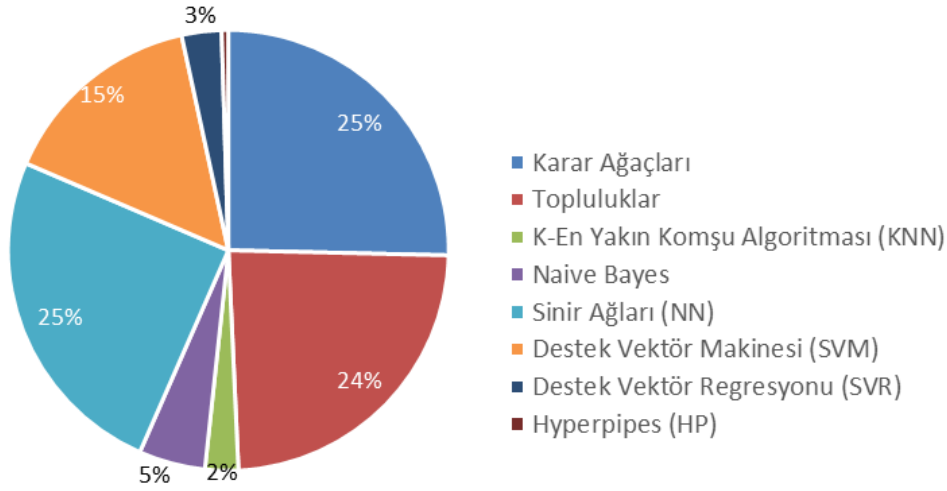
Şekil 4. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan iki değişkenli istatistiksel yöntemler (BS)



Şekil 5. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan çok değişkenli istatistiksel yöntemler (MS)



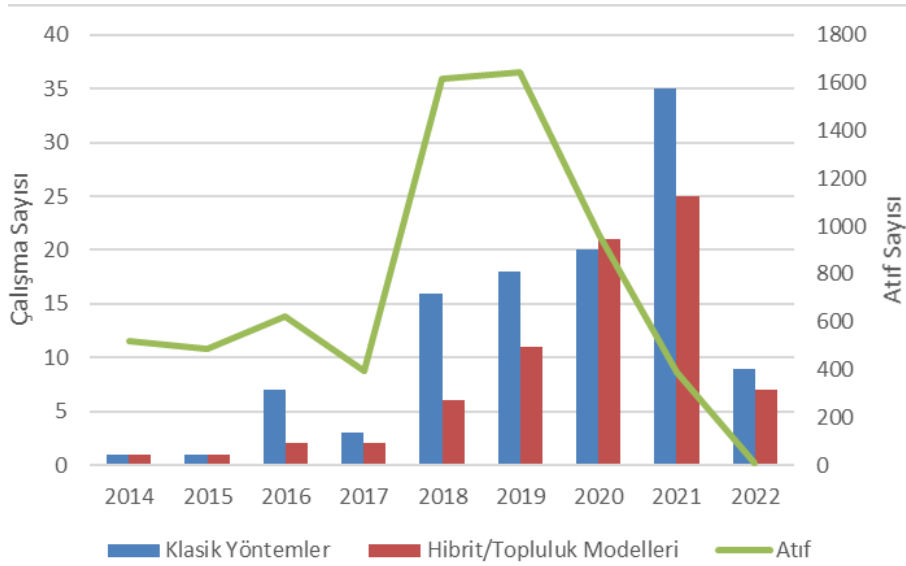
Şekil 6. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan esnek hesaplama yöntemleri



Şekil 7. İncelenen çalışmalarda taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan makine öğrenimi denetimli öğrenme algoritmaları

4. Sonuç ve Tartışma

Canlı yaşamı ve ekonomik faaliyetler üzerinde büyük kayıplara yol açabilecek potansiyele sahip taşkın afeti küresel ölçekte her yıl yaşamın olağan akışını aksamaya uğratmakta ve/veya geri döndürülemez kayıplara neden olmaktadır. (Rehman vd., 2022). Bütüncül taşkın yönetimi taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulması önemli bir yere sahiptir. CBS platformlarında analizi, güncellemesi ve farklı kullanıcılar tarafından kullanım/entegrasyonu mümkün olan taşkın duyarlılık haritaları, yerel planlamacılar ve devlet kurumları için erken uyarı sistemlerinin tasarlanmasında, böylelikle olası can kayıpları ve sosyoekonomik zararların azaltılmasında etkilidir (Rehman vd., 2022). Bu bağlamda, özellikle bölgesel ölçekte taşkın duyarlılık analizleri literatürde birçok bilim insanının araştırma konusu olmuştur. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar tarafından önerilen yöntemler, uzman görüşü tabanlı veya veri tabanlı olması ve uygulama kolaylığı açısından birbirlerine göre farklılık göstermektedir. AHP gibi MCDM yöntemleri ile frekans oranı ve lojistik regresyon gibi istatistiksel yöntemler uygulama kolaylığı ve yüksek doğruluk oranlarıyla taşkın duyarlılık çalışmalarının yapıldığı ilk yıllardan günümüze değin tercih edilme oranı yüksek yöntemlerdir (Tablo 2, Şekil 2, 3 ve 4). Bununla birlikte, karmaşık gerçek yaşam problemlerinin belirsizliklerine karşı insan zekasının bilişsel yaklaşım modelini oluşturan esnek hesaplama yöntemlerinin taşkın duyarlılık analizlerinde son yıllarda yapılan çalışmalarda belirgin şekilde daha fazla tercih edildiği görülmektedir (Tablo 1, Şekil 2, 6 ve 7). Bu eğilimin sebebi, araştırmacıların da çalışmalarında belirttikleri gibi, taşkın karmaşık mekanizması nedeniyle genellikle doğrusal olmayan bir yapıya sahip olmasıdır (Costache ve Bui, 2019; Tehrany vd., 2015; Liu vd., 2022). Taşkın bu doğası araştırmacıları geleneksel hesaplama yöntemlerinden, karmaşık yapıda olan ve belirsizlik içeren gerçek yaşam problemlerinin çözülmesi için hesaplamalı zeki yöntemlerin kombinasyonunu sunan sezgisel yaklaşımların kullanıldığı esnek hesaplama yöntemlerine yönelmeye teşvik etmiştir. Bununla birlikte, taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında daha objektif sonuçlar elde etmeyi amaçlayan araştırmacılar; MCDM yöntemleri, istatistiksel yöntemler ve esnek hesaplama yöntemlerinin birbiriyle entegre olarak kullanıldığı yeni hibrit modeller ile iki veya daha fazla yöntemin bir arada kullanıldığı topluluk modelleri önermektedir (Şekil 8). Hibrit modellerin kullanıldığı ve diğer yöntemlerle karşılaştırıldığı hemen her çalışmada önerilen modellerin doğruluk oranının kullanılan geleneksel yöntemlerden daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Shahabi vd., 2021; Pham vd., 2018). İncelenen çalışmalara göre hibrit ve topluluk modelleri 2018 yılından günümüze değin taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında gittikçe artan bir kullanım oranına sahiptir (Şekil 8). Yine incelenen çalışmalarda en çok toplam atıf alan 2018 ve 2019 yıllarında yapılan çalışmalara bakıldığında, 22 kez MCDM yöntemlerinin, 31 kez istatistiksel yöntemlerin, 15 kez metasezgisel optimizasyon algoritmalarının, 13 kez bulanık mantık ve 40 kez makine öğrenimi algoritmalarının kullanıldığı görülmektedir. Bu duruma istinaden, 2018 ve 2019 yıllarında geleneksel yöntemlerden daha fazla tercih edilmiş olan esnek hesaplama yöntemlerinin, alınan toplam atıf sayısındaki artışı etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 8. İncelenen çalışmalarda kullanılan yöntem ve modellerin yıllara göre dağılımı ile çalışmaların yıl bazlı aldığı toplam atif sayısı

Önceki bölümde ve bu bölüm içerisinde bahsedilen yaklaşımların her birinin güçlü yönleri olmasının yanısıra taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulması açısından çeşitli belirsizlikler üretebilecek belirli zayıflıkları vardır (Vojtek ve Vojteková, 2019). Bu nedenle, taşkın duyarlılık analizleri için seçilen metodoloji, parametrelerin taşkın oluşturan mekanizmalar üzerindeki etkisinin mekansal olarak sürekli ve kümülatif doğasını yeterince temsil etmelidir (Vojtek ve Vojteková, 2019). Ek olarak, taşkın duyarlılık haritalaması için uygun bir metodolojinin seçimi mekansal ölçeğe de (yerel, bölgesel, ulusal veya küresel) bağlı olmalıdır (Vojtek ve Vojteková, 2019).

Teşekkür

Değerli görüş ve katıklarından dolayı Prof. Dr. Hakan Çağdaş Aladağ'a teşekkür ederim.

Kaynaklar

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281.
- Al-Abadi, A. M. (2018). Mapping flood susceptibility in an arid region of southern Iraq using ensemble machine learning classifiers: a comparative study. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(9), 1-19.
- Albano, R., & Sole, A. (2018). Geospatial methods and tools for natural risk management and communications. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(12), 470-479.
- Ali, S. A., Parvin, F., Pham, Q. B., Vojtek, M., Vojteková, J., Costache, R., Linh, N. T., Nguyen, H. O., Ahmad, A., & Ghorbani, M. A. (2020). GIS-based comparative assessment of flood susceptibility mapping using hybrid multi-criteria decision-making approach, naïve Bayes tree, bivariate statistics and logistic regression: a case of Topľa basin, Slovakia. *Ecological Indicators*, 117, 106620. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106620.
- Arora, A., Arabameri, A., Pandey, M., Siddiqui, M. A., Shukla, U. K., Bui, D. T., Mishra, V. N., & Bhardwaj, A. (2021). Optimization of state-of-the-art fuzzy-metaheuristic ANFIS-based machine learning models for flood susceptibility prediction mapping in the Middle Ganga Plain, India. *Science of the Total Environment*, 750, 141565. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141565.
- Arslankaya, D., & Göraltay, K. (2019). *Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinde Güncel Yaklaşımlar*. Ankara: Iksad Publications.
- Avrupa Komisyonu, (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks, Official Journal of the European Communities, 288, 27-34.
- Balica, S. F., Wright, N. G., & Van der Meulen, F. (2012). A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts. *Natural Hazards*, 64(1), 73-105.

- Balogun, A., Quan, S., Pradhan, B., Dano, U., & Yekeen, S. (2020). An improved flood susceptibility model for assessing the correlation of flood hazard and property prices using geospatial technology and fuzzy-ANP. *Journal of Environmental Informatics*, 37(2), 107-122.
- Bera, S., Das, A., & Mazumder, T. (2022). Evaluation of machine learning, information theory and multi-criteria decision analysis methods for flood susceptibility mapping under varying spatial scale of analyses. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100686. doi: 10.1016/j.rsase.2021.100686.
- Buckley, J. J., & Hayashi, Y. (1994). Fuzzy neural networks: A survey. *Fuzzy Sets and Systems*, 66(1), 1-13.
- Bui, Q. T., Nguyen, Q. H., Nguyen, X. L., Pham, V. D., Nguyen, H. D., & Pham, V. M. (2020). Verification of novel integrations of swarm intelligence algorithms into deep learning neural network for flood susceptibility mapping. *Journal of Hydrology*, 581, 124379, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124379.
- Chen, Z., & Wang, J. (2007). Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada. *Natural Hazards*, 42(1), 75-89.
- Chowdary, V. M., Chakraborty, D., Jeyaram, A., Murthy, Y. V. N., Sharma, J. R., & Dadhwal, V. K. (2013). Multi-criteria decision making approach for watershed prioritization using analytic hierarchy process technique and GIS. *Water Resources Management*, 27(10), 3555-3571.
- Costache, R. (2019). Flood susceptibility assessment by using bivariate statistics and machine learning models-a useful tool for flood risk management. *Water Resources Management*, 33(9), 3239-3256.
- Costache, R., & Bui, D. T. (2019). Spatial prediction of flood potential using new ensembles of bivariate statistics and artificial intelligence: A case study at the Putna river catchment of Romania. *Science of The Total Environment*, 691, 1098-1118.
- Custer, R. (2015). *Hierarchical modelling of flood risk for engineering decision analysis*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering. Retrieved from http://orbit.dtu.dk/files/124322422/Rocco_Custer_Til_Orbit.pdf.
- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228.
- Dano, U. L., Balogun, A. L., Matori, A. N., Wan Yusouf, K., Abubakar, I. R., Said Mohamed, M. A., ... & Pradhan, B. (2019). Flood susceptibility mapping using GIS-based analytic network process: A case study of Perlis, Malaysia. *Water*, 11(3), 615. doi: 10.3390/w11030615.
- Derin Cengiz, L. (2020). *Farklı analitik hiyerarşi süreci yöntemlerinin heyelan duyarlılığı haritalamalarındaki etkinliğinin araştırılması* (Doktora Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Derin Cengiz, L., & Ercanoğlu, M. (2022). A novel data-driven approach to pairwise comparisons in AHP using fuzzy relations and matrices for landslide susceptibility assessments. *Environmental Earth Sciences*, 81(7), 1-23.
- DFO. (2014). Dartmouth Flood Observatory. Retrieved from: <http://www.dartmouth.edu/>
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N., ... & Efstratiadis, A. (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*, 534, 478-492.
- Ibrahim, D. (2016). An overview of soft computing. *Procedia Computer Science*, 102, 34-38.
- EM-DAT. (2012, Mart 30). *The international disaster database. Natural Disasters Trends*. Retrieved from <http://www.emdat.be/natural-disasters-trends>
- Fenicia, F., Kavetski, D., Savenije, H. H., Clark, M. P., Schoups, G., Pfister, L., & Freer, J. (2014). Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence?. *Hydrological Processes*, 28(4), 2451-2467.
- Hamurcu, M., & Eren, T. (2015). Ankara Büyükşehir Belediyesi'nde çok ölçütlü karar verme yöntemi ile monoray güzergâh seçimi. *Transist*, 8, 410-419.
- Hong, H., Tsangaratos, P., Iliä, I., Liu, J., Zhu, A. X., & Chen, W. (2018). Application of fuzzy weight of evidence and data mining techniques in construction of flood susceptibility map of Poyang County, China. *Science of the Total Environment*, 625, 575-588.
- Jacinto, R., Grosso, N., Reis, E., Dias, L., Santos, F. D., & Garrett, P. (2015). Continental Portuguese territory flood susceptibility index—contribution to a vulnerability index. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8), 1907-1919.
- Jeb, D. N., & Aggarwal, S. P. (2008). Flood inundation hazard modeling of the River Kaduna using remote sensing and geographic information systems. *Journal of Applied Sciences Research*, 4(12), 1822-1833.
- Jebur, M. N., Pradhan, B., & Tehrany, M. S. (2014). Optimization of landslide conditioning factors using very high-resolution airborne laser scanning (LiDAR) data at catchment scale. *Remote Sensing of Environment*, 152, 150-165.
- Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. Washington D.C., USA: World Bank Publications.

- Kaya, Ç. M. (2017). *Akım gözlem istasyonu bulunmayan taşkın havzalarındaki değişimlerin taşkın riskine etkisinin belirlenmesi: Rize, Güneysu örneği* (Doktora Tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Kaya, Ç. M. (2018). Taşkın riskinin belirlenmesinde sosyo-demografik ve sosyo-ekonomik özelliklerin önemi. *Afet ve Risk Dergisi*, 1(1), 53-62.
- Kaya, Ç. M. (2021). 1B ve 2B taşkın modellemesinin karşılaştırılması: Fol deresi örneği. *Afet ve Risk Dergisi*, 5(1), 13-21.
- Kia, M. B., Pirasteh, S., Pradhan, B., Mahmud, A. R., Sulaiman, W. N. A., & Moradi, A. (2012). An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67(1), 251-264.
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325-336.
- Kundzewicz, Z. W., Pińskwar, I., & Brakenridge, G. R. (2013). Large floods in Europe, 1985–2009. *Hydrological Sciences Journal*, 58(1), 1-7. doi: 10.1080/02626667.2012.745082.
- Lavoie, B., & Mahdi, T. F. (2017). Comparison of two-dimensional flood propagation models: SRH-2D and Hydro_AS-2D. *Natural Hazards*, 86(3), 1207-1222.
- Lee, S. (2005). Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), 1477-1491.
- Lee, S., & Talib, J. A. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), 982-990.
- Lee, S., & Pradhan, B. (2007). Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4(1), 33-41.
- Li, Q., Jiang, X., & Liu, D. (2013). Analysis and modelling of flood risk assessment using information diffusion and artificial neural network. *Water SA*, 39(5), 643-648.
- Li, X., Yan, D., Wang, K., Weng, B., Qin, T., & Liu, S. (2019). Flood risk assessment of global watersheds based on multiple machine learning models. *Water*, 11(8), 1654-1672.
- Liu, J., Wang, J., Xiong, J., Cheng, W., Li, Y., Cao, Y., He, Y., Duan, Y., He, W., & Yang, G. (2022). Assessment of flood susceptibility mapping using support vector machine, logistic regression and their ensemble techniques in the Belt and Road region. *Geocarto International*, doi: 10.1080/10106049.2022.2025918.
- Mahmoud, S. H., & Gan, T. Y. (2018). Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East. *Journal of Cleaner Production*, 196, 216-229.
- Neumüller, C., Wagner, S., Kronberger, G., & Affenzeller, M. (2011, February). Parameter meta-optimization of metaheuristic optimization algorithms. In *International Conference on Computer Aided Systems Theory. Proceedings*. (pp. 367-374). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Pham, B. T., Shirzadi, A., Bui, D. T., Prakash, I., & Dholakia, M. B. (2018). A hybrid machine learning ensemble approach based on a radial basis function neural network and rotation forest for landslide susceptibility modeling: A case study in the Himalayan area, India. *International Journal of Sediment Research*, 33(2), 157-170.
- Pradhan, B. (2013). A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers & Geosciences*, 51(2), 350-365.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2016). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70.
- Rahmati, O., Darabi, H., Panahi, M., Kalantari, Z., Naghibi, S. A., Ferreira, C. S. S., Kornejady, A., Karimidastenaie, Z., Mohammadi, F., Stefanidis, S., Bu, D. T., & Haghghi, A. T. (2020). Development of novel hybridized models for urban flood susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 10(1), 12937. doi: 10.1038/s41598-020-69703-7.
- Rehman, S., Hasan, M. S. U., Rai, A. K., Rahaman, M. H., Avtar, R., & Sajjad, H. (2022). Integrated approach for spatial flood susceptibility assessment in Bhagirathi sub-basin, India using entropy information theory and geospatial technology. *Risk Analysis*, doi: 10.1111/risa.13887.
- Rentschler, J., & Salhab, M. (2020). *People in harm's way: Flood exposure and poverty in 189 countries*. The World Bank. Retrieved from <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34655>
- Roy, P., Pal, S. C., Arabameri, A., Rezaie, F., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., ... & Das, B. (2021). Climate and land use change induced future flood susceptibility assessment in a sub-tropical region of India. *Soft Computing*, 25(8), 5925-5949.
- Ruidas, D., Chakraborty, R., Islam, A. R. M., Saha, A., & Pal, S. C. (2022). A novel hybrid of meta-optimization approach for flash flood-susceptibility assessment in a monsoon-dominated watershed, Eastern India. *Environmental Earth Sciences*, 81(5), 145. doi: 10.1007/s12665-022-10269-0.
- Saaty, T. L. (1985). Decision making for leaders. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15(3), 450-452.

- Shunca, S., & Katayama, T. (1994). The flood disaster and mitigation projects in Yangtze Delta area. In *INCEDE Report 1994-01* (Vol. 2, pp. 143-8). International Center for Disaster-Mitigation Engineering.
- Saleh, A., Yuzir, A., Sabtu, N., Abujayyab, S. K., Bunmi, M. R., & Pham, Q. B. (2022). Flash flood susceptibility mapping in urban area using genetic algorithm and ensemble method. *Geocarto International*, doi: 10.1080/10106049.2022.2032394.
- Shahabi, H., Shirzadi, A., Ronoud, S., Asadi, S., Pham, B. T., Mansouripour, F., ... & Bui, D. T. (2021). Flash flood susceptibility mapping using a novel deep learning model based on deep belief network, back propagation and genetic algorithm. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101100. doi: 10.1016/j.gsf.2020.10.007.
- Siam, Z. S., Hasan, R. T., Anik, S. S., Noor, F., Adnan, M. S. G., & Rahman, R. M. (2021, July). Study of Hybridized Support Vector Regression Based Flood Susceptibility Mapping for Bangladesh. In *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems* (pp. 59-71). Springer, Cham.
- Sole, A., Giosa, L., Albano, R., & Cantisani, A. (2013). The laser scan data as a key element in the hydraulic flood modelling in urban areas. *Proceedings of the international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences—ISPRS archive*, XL-4/W1, 65–70.
- Stavropoulos, S., Zaimis, G. N., Filippidis, E., Diaconu, D. C., & Emmanouloudis, D. (2020). Mitigating flash floods with the use of new technologies: A Multi-criteria decision analysis to map flood susceptibility for Zakynthos Island, Greece. *Journal of Urban and Regional Analysis*, 12(2), 233-248.
- Tella, A., & Balogun, A. L. (2020). Ensemble fuzzy MCDM for spatial assessment of flood susceptibility in Ibadan, Nigeria. *Natural Hazards*, 104(3), 2277-2306.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, 504, 69-79.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014a). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332-343.
- Tehrany, M. S., Lee, M. J., Pradhan, B., Jebur, M. N., & Lee, S. (2014b). Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. *Environmental Earth Sciences*, 72(10), 4001-4015.
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., Mansor, S., & Ahmad, N. (2015). Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125, 91-101.
- Tehrany, M. S., Jones, S., & Shabani, F. (2019). Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. *Catena*, 175, 174-192.
- Termeh, S. V. R., Kornejady, A., Pourghasemi, H. R., & Keesstra, S. (2018). Flood susceptibility mapping using novel ensembles of adaptive neuro fuzzy inference system and metaheuristic algorithms. *Science of the Total Environment*, 615, 438-451.
- Tang, Z., Yi, S., Wang, C., & Xiao, Y. (2018). Incorporating probabilistic approach into local multi-criteria decision analysis for flood susceptibility assessment. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 32(3), 701-714.
- UNDP. (2004). World Energy Assessment—Energy and the Challenge of Sustainability. Overview: 2004 Update. United Nations Development Programme, New York.
- USGS. (2022, Mart 30). *Floods and Flood Plains*. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/of/1993/ofr93-641/pdf/ofr93-641.pdf>
- URL-1. (2022, Mart 30). *Esnek Hesaplamaya Giriş*. Retrieved from <https://ekblc.files.wordpress.com/2013/09/esnek-hesaplamaya-giric59f.pdf>
- URL-2. (2022, Mart 30). *Yapay zeka: esnek hesaplama ve örnek bazı uygulamalar*. Retrieved from https://cdn.bartın.edu.tr/istatistikhesaplama/04e2a9cf26efbde9d694b803c2b5074a/yzesnekhesaplama_4gulZTz.pdf
- Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Wang, Z., Lai, C., Chen, X., Yang, B., Zhao, S., & Bai, X. (2015). Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 527, 1130-1141.
- Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Pamučar, D., Gigović, L., Dropnjak, S., Bui D. T., & Duan, H. (2018). A hybrid GIS multi-criteria decision-making method for flood susceptibility mapping at Shangyou, China. *Remote Sensing*, 11(1), 62. doi: 10.3390/rs11010062.
- Wubalem, A., Tesfaw, G., Dawit, Z., Getahun, B., Mekuria, T., & Jothimani, M. (2021). Comparison of statistical and analytical hierarchy process methods on flood susceptibility mapping: In a case study of the Lake Tana sub-basin in northwestern Ethiopia. *Open Geosciences*, 13(1), 1668-1688.
- Vojtek, M., & Vojteková, J. (2019). Flood susceptibility mapping on a national scale in Slovakia using the analytical hierarchy process. *Water*, 11(2), 364-381.
- Zadeh, L. A. (1994, April). Fuzzy logic: issues, contentions and perspectives. In *ICASSP'94. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Proceedings*. (Vol. 6, pp. VI/183). IEEE.